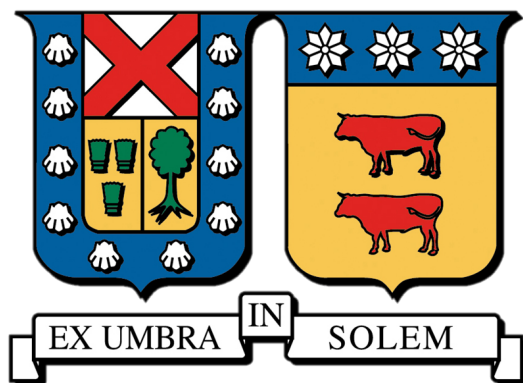


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL



ANÁLISIS CUANTITATIVO DE CONSUMO DE ENERGÍA Y
MATERIALES DE PLANTAS DESALINIZADORAS DE AGUA DE
MAR MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA

CARMEN CARRASCO MUÑOZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL AMBIENTAL

PROFESOR GUÍA: DR. ADRIÁN ORTIZ

PROFESORA CO-REFERENTE: DRA. PAULA GUERRA

CO-REFERENTE: ROBERTO MEZA

MAYO-2024

“Uno es valiente cuando, sabiendo que ha perdido ya antes de empezar, empieza a pesar de todo y sigue hasta el final pase lo que pase. Uno vence raras veces, pero alguna vez vence”

Harper Lee, Matar un Ruiseñor.

Agradecimientos

Quiero dedicar este logro a mi papá, aunque ya no estés físicamente conmigo, tu recuerdo sigue siempre en mi corazón. Me enseñaste a luchar por lo que quiero y a no rendirme.

Agradezco a mi madre por ser mi roca y mi ejemplo a seguir, siempre he podido contar contigo, y estoy tremendamente agradecida de tu presencia en mi vida. A mi hermana, aunque me vuelves loca, siempre sabes cómo sacarme una sonrisa, incluso en los momentos más difíciles.

A mi tía Cricri, gracias por escucharme, aconsejarme y hacerme reír. Y a toda mi familia, gracias por su apoyo.

A los amigos que me dio la universidad, especialmente Cote, Seba, Jeymme, Mati, Rocío y Jose, gracias por ser parte de mis risas, lágrimas y experiencias inolvidables. Su apoyo ha sido fundamental para llegar hasta aquí, no lo hubiera logrado sin ustedes. También a mis amigas de toda la vida, Angel y Rayen, gracias por estar siempre, espero que nuestra amistad siga por muchos años más.

A mis ahijados, gracias por las risas y el apoyo. Estoy feliz de haberlos conocido, espero haberles ayudado en su camino.

También quiero agradecer a Jhonattan por el apoyo, las risas, los buenos momentos, y especialmente por la paciencia al ayudarme con latex y con la tecnología en general, esta tesis literalmente no hubiera sido posible sin tu ayuda.

Agradezco a los profesores que han guiado mi camino académico con su dedicación y paciencia. Su conocimiento ha enriquecido mi aprendizaje de manera considerable. Y un especial agradecimiento al profesor Adrián y a la profesora Paula por esta oportunidad, y a Roberto Meza, por todo su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

También agradezco al proyecto IDRO, por darme la oportunidad de realizar mi tesis y aprender junto a ustedes.

Este logro no habría sido posible sin el apoyo y la comprensión de todas estas personas especiales. Estoy eternamente agradecida con cada uno de ustedes.

Resumen

La creciente crisis hídrica ha impulsado la búsqueda de nuevas formas de obtener agua para distintos objetivos. Entre estas opciones, la desalinización surge como una alternativa en constante crecimiento, por lo que resulta importante estudiar sus efectos e implicaciones.

A lo largo de esta tesis se presenta un análisis cuantitativo de los consumos de energía, químicos y materiales en plantas de diferentes tamaños, utilizando agua de mar de dos costas distintas, para observar estas variables influyen en los consumos de la planta. Este análisis fue realizado con el programa WAVE, junto con ecuaciones de diseño. Permitiendo establecer las distintas variables asociadas al proceso.

Los resultados muestran que la energía consumida tiene un comportamiento directamente proporcional con la producción de agua, y que el requerimiento energético es mayor en la región de Valparaíso. Esto se puede atribuir tanto a su mayor cantidad de sólidos suspendidos como al hecho de que el agua en la región de Atacama tiene una temperatura mayor, lo que causa una mayor permeabilidad de la membrana.

Además, se analizó la cantidad de membranas utilizadas en cada modelación, presentando una relación directamente proporcional entre el número de membranas y la producción de agua. Obteniendo que la región de Valparaíso necesita una mayor cantidad de membranas, lo cual se puede asociar a su mayor cantidad de sólidos disueltos.

En cuanto a los químicos de pretratamiento y limpieza, presentan una relación directamente proporcional con el agua producida. La mayoría de los casos muestran un valor igual para ambas modelaciones, y las diferencias observadas se atribuyen a la variación en el pH y la presencia de una mayor cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Asimismo, en los químicos necesarios en el post-tratamiento, se observó nuevamente una relación directamente proporcional, pero también una notable diferencia: el agua potable requiere una mayor cantidad de químicos, mientras que el agua para minería y agricultura únicamente necesita el lecho de calcita para remineralizar el agua y disminuir su corrosividad.

Existen diversos métodos para disminuir los consumos de las plantas y reducir sus desechos, o darles una segunda vida. Sin embargo, muchos de estos procesos aún están en desarrollo.

Índice general

1. Introducción	1
2. Objetivos	6
2.1. Objetivo General	6
2.2. Objetivos Específicos	6
3. Antecedentes de la Desalinización de Agua de Mar Mediante Ósmosis Inversa	7
3.1. Principios Físicos y Químicos detrás de la Ósmosis Inversa	7
3.1.1. Principios Físicos de la Ósmosis Inversa	7
3.1.2. Principios Químicos de la Ósmosis Inversa	9
3.2. Proceso de Desalinización por Ósmosis Inversa	10
3.2.1. Captación de Agua	10
3.2.2. Pre-tratamiento	11
3.2.3. Tratamiento	15
3.2.4. Limpieza	18
3.2.5. Post-tratamiento	19
3.2.6. Desechos	21
3.2.7. Otros Equipos Necesarios en el Proceso	21
3.3. Usos de agua de desalinización	22
3.3.1. Agua para consumo humano	22
3.3.2. Agua para mineras	22
3.3.3. Agua para la agricultura	23
4. Impactos de la Desalinización y Sostenibilidad	25
4.1. Impacto Ambiental	25
4.2. Captación	25
4.3. Descarga	26
4.3.1. Salinidad	27

4.3.2.	Químicos desinfectantes	27
4.3.3.	Aditivos químicos	27
4.3.4.	Metales pesados	27
4.3.5.	Disposición de la descarga	28
4.3.6.	Otros usos para la descarga	28
4.4.	Desechos de Materiales	29
4.4.1.	Segunda vida para membranas de ósmosis inversa	30
4.4.2.	Reciclaje de membranas de ósmosis inversa	30
4.5.	Consumo energético	31
4.5.1.	Dispositivos de Recuperación de Energía	31
4.5.2.	Uso de Energías Renovables	32
4.6.	Aspectos que influyen en los impactos ambientales de las plantas desalinizadoras . .	33
4.6.1.	Tamaño de la planta	33
4.6.2.	Ubicación de la planta	33
5.	Marco Normativo y Regulatorio	35
5.1.	Legislación y Regulaciones pertinentes para el proceso	35
5.1.1.	Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (19.300)	35
5.1.2.	Norma Chilena NCh 409/1: Agua Potable	36
5.1.3.	Norma Chilena NCh 1333: Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos	37
5.1.4.	Código de Aguas	38
5.1.5.	Guía para la descripción de Proyectos de Plantas Desalinizadoras en el SEIA	38
5.1.6.	DL N°2.222 1978: Ley de Navegación	39
5.1.7.	D.S N°1 1992: Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática . .	39
5.1.8.	D.S. N°90 2000: Establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales	39
5.1.9.	Ley N°20.293: Protege a los Cetáceos e Introduce Modificaciones a la Ley N° 18.892 General de Pesca y Acuicultura	39
5.1.10.	DS N°430 1992: Fija el Texto Refundido, Coordinado y Sistematizado de la Ley N°18.892 y sus Modificaciones, Ley General de Pesca y Acuicultura . . .	39
5.2.	Análisis	40
6.	Metodología	42
6.1.	Programa WAVE	42
6.2.	Descripción de la Modelación	43

6.2.1.	Supuestos	43
6.2.2.	Limitaciones por Falta de Datos u Otros	44
6.2.3.	Caracterización de parámetros clave	44
6.2.4.	Definición Parámetros de Ultrafiltración	47
6.2.5.	Definición Parámetros para Químicos de Limpieza y Pre-tratamiento	48
6.2.6.	Definición Parámetros de Ósmosis Inversa	49
6.3.	Definición Parámetros Acondicionamiento	50
6.3.1.	Remineralización Agua para Consumo Humano	51
6.3.2.	Remineralización Agua para Minería	52
6.3.3.	Remineralización Agua para Riego	53
6.4.	Ecuaciones Utilizadas	53
7.	Resultados	56
7.1.	Resultados de la Modelación	56
7.2.	Cálculos a partir de Resultados de la Modelación	59
7.2.1.	Valores de Energía en Ultrafiltración	59
7.2.2.	Valores de Energía en Ósmosis Inversa	59
7.2.3.	Cambio de Membranas	61
7.2.4.	Cantidades de Químicos en el Pretratamiento	62
7.2.5.	Cantidades de Químicos para la Limpieza de Membranas	65
7.3.	Acondicionamiento del Agua	68
7.3.1.	Acondicionamiento del Agua para Consumo Humano	69
7.3.2.	Acondicionamiento del Agua para Minería	71
7.3.3.	Acondicionamiento del agua para agricultura	72
7.4.	Validación de la Modelación	73
7.4.1.	Cantidad de Membranas	73
7.4.2.	Valores de Energía	75
7.4.3.	Dosis de Químicos	76
8.	Discusión de Resultados	77
8.1.	Consumo energético	79
8.1.1.	Implicaciones del Consumo Energético	79
8.1.2.	Posibilidades de reducción de Consumo Energético	80
8.2.	Consumo de Materiales	81
8.2.1.	Implicaciones del Consumo de Materiales	81
8.2.2.	Posibilidades de reducción del Consumo de Materiales	82
8.3.	Consumo de Químicos de Pre-tratamiento y Limpieza	82

8.3.1.	Implicaciones del Consumo de químicos de pre-tratamiento y limpieza	82
8.3.2.	Posibilidades de reducción del Consumo de Químicos de pre-tratamiento y limpieza	83
8.4.	Consumo de Químicos en Acondicionamiento	84
8.4.1.	Implicaciones del Consumo de químicos en acondicionamiento	84
8.4.2.	Posibilidades de reducción del Consumo de químicos en acondicionamiento .	84
8.5.	Estrategias para mejora	85
8.5.1.	Mejoras asociadas a la energía	85
8.5.2.	Mejoras asociadas al uso de químicos	86
8.5.3.	Mejoras asociadas a las membranas	86
8.5.4.	Otras mejoras	87
9.	Conclusiones y Recomendaciones	88
10.	Anexo	98
10.1.	Tabla Valores de Energía en Ultrafiltración	98
10.2.	Tabla Valores de Energía en Ósmosis Inversa	98
10.3.	Tabla Valores Cambio de Membranas	99
10.4.	Tablas Dosis Químicos en el Pre-tratamiento	99
10.4.1.	Dosis mensual de Ácido Sulfúrico	99
10.4.2.	Dosis mensual de Hipoclorito de Sodio	99
10.4.3.	Dosis mensual de Metabisulfito de Sodio	100
10.4.4.	Dosis mensual de Hexametáfosfato de Sodio	100
10.5.	Tablas Dosis Químicos para Limpieza de Membranas	100
10.5.1.	Clean in Place (CIP)	100
10.5.2.	Chemically Enhanced Backwashing (CEB)	101
10.6.	Tablas Dosis Químicos para Acondicionamiento	102
10.6.1.	Acondicionamiento del Agua para Consumo Humano	102
10.6.2.	Acondicionamiento del Agua para Minería	102
10.6.3.	Acondicionamiento del Agua para Agricultura	103

Índice de Tablas

6.1.	<i>Tamaños de plantas desalinizadoras usados en las modelaciones. Elaboración propia.</i>	46
6.2.	<i>Valores de agua de mar en la región de Atacama y de Valparaíso (Ministerio de Medio Ambiente, 2017; SGA S.A. Soluciones en Gestión Ambiental, 2017, 2019)</i>	47
6.3.	<i>Valores concentración iones agua de mar. Elaboración propia a partir de librería de agua de mar programa WAVE.</i>	47
6.4.	<i>Características Membrana IntegraPac IPD-51. Elaboración propia a partir de (Delta Filtration, 2022)</i>	48
6.5.	<i>Dosificaciones Químicos. Elaboración propia a partir de (Wang et al., 2011).</i>	48
6.6.	<i>Características Membrana SW30XLE-440. Elaboración propia a partir de (DuPont, 2020)</i>	50
6.7.	<i>Valores lecho de remineralización. Elaboración propia a partir de (Drintec, 2023).</i>	51
6.8.	<i>Parámetros agua potable en Chile. Elaboración propia a partir de (Instituto Nacional de Normalización, 2005).</i>	51
6.9.	<i>Parámetros agua de riego en Chile. Elaboración propia a partir de (Instituto Nacional de Normalización, 1987).</i>	53
6.10.	<i>Densidades de los químicos utilizados en el proceso. Elaboración propia.</i>	54
7.1.	<i>Resumen de Parámetros de Entrada y Salida para plantas con producción de 1[L/s]. Elaboración propia a partir de datos de modelación.</i>	56
7.2.	<i>Resumen de Parámetros de Entrada y Salida para plantas con producción de 10[L/s]. Elaboración propia a partir de datos de modelación.</i>	57
7.3.	<i>Resumen de Parámetros de Entrada y Salida para plantas con producción de 100[L/s]. Elaboración propia a partir de datos de modelación.</i>	57
7.4.	<i>Resumen de Parámetros de Entrada y Salida para plantas con producción de 1000[L/s]. Elaboración propia a partir de datos de modelación.</i>	57
7.5.	<i>Resumen de Parámetros de Entrada y Salida para plantas con producción de 10000[L/s]. Elaboración propia a partir de datos de modelación.</i>	58
7.6.	<i>Membranas utilizadas durante el proceso. Elaboración propia a partir de datos de modelación</i>	58

7.7. Demanda de Químicos para plantas desalinizadoras. Elaboración propia a partir de datos de modelación.	58
7.8. Calcita, dióxido de carbono y sulfato de magnesio necesarios para remineralización del agua. Elaboración propia.	69
7.9. Valores agua remineralizada. Elaboración propia.	69
7.10. Características lechos necesarios para la remineralización de agua potable. Elaboración propia.	70
7.11. NaOCl y NaF necesarios para agua potable. Elaboración propia.	70
7.12. Calcita y dióxido de carbono necesarios para remineralización del agua para minería. Elaboración propia.	71
7.13. Calcita y dióxido de carbono necesarios para remineralización del agua para riego. Elaboración propia.	72
7.14. Cálculo de membranas. Elaboración propia.	74
7.15. Error en valores de membranas. Elaboración propia.	75
7.16. Tabla comparativa valores de energía. Elaboración propia.	75
7.17. Tabla comparativa valores de energía. Elaboración propia.	76
7.18. Tabla comparativa dosis de químicos. Elaboración propia con datos de (DuPont, 2022; Guajardo Arriagada, 2023; Voutchkov, 2013).	76
8.1. Comparación en distintos métodos (Panagopoulos et al., 2019); (Schantz et al., 2018); (Voutchkov, 2013); (Campioni et al., 2018); (Doornbusch et al., 2020).	78
10.1. Valores de Energía Ultrafiltración. Elaboración propia.	98
10.2. Valores de Energía Ósmosis inversa. Elaboración propia.	98
10.3. Membranas necesarias a lo largo de la vida de la planta. Elaboración propia.	99
10.4. Dosis mensual de H_2SO_4 . Elaboración propia	99
10.5. Dosis mensual de NaOCl. Elaboración propia.	99
10.6. Dosis mensual de $Na_2S_2O_5$. Elaboración propia.	100
10.7. Dosis mensual de $Na_6P_6O_{18}$. Elaboración propia.	100
10.8. Dosis anual de ácido cítrico. Elaboración propia.	100
10.9. Dosis anual de ácido clorhídrico. Elaboración propia.	101
10.10 Dosis anual de hipoclorito de sodio. Elaboración propia.	101
10.11 Dosis anual de NaOH. Elaboración propia.	101
10.12 Dosis mensual de HCl. Elaboración propia.	102
10.13 Dosis mensual de NaOCl. Elaboración propia.	102
10.14 Químicos necesarios diariamente para potabilizar el agua. Elaboración propia.	102

10.15	<i>Químicos necesarios diariamente para acondicionar el agua para su uso en minería. Elaboración propia.</i>	102
10.16	<i>Químicos necesarios diariamente para acondicionar el agua de riego. Elaboración propia.</i>	103

Índice de figuras

1.1.	<i>Estrés hídrico en el mundo (Kuzma et al., 2023)</i>	2
1.2.	<i>Mapa de desalinizadoras en Chile. (Comité Científico de Cambio Climático, 2022)</i>	4
3.1.	<i>Proceso de desalinización mediante ósmosis inversa (Aimone Arredondo, 2024).</i>	10
3.2.	<i>(a) Captación en pozo de playa (Comisión Nacional del Agua, 2016). (b) Captación superficial (De Miguel, 2016). (c) Captación sub-superficial (Missimer & Maliva, 2017)</i>	11
3.3.	<i>Tamiz (COTECNO, 2022)</i>	12
3.4.	<i>(a) Membrana de ultrafiltración fibra hueca (PENTAIR, 2019). (b) Detalle fibra hueca (Solís-Carvajal et al., 2017).</i>	14
3.5.	<i>Módulos de ultrafiltración (Pure Aqua, Inc., s.f.)</i>	15
3.6.	<i>Membrana de ósmosis inversa (Carbotecnia.info, s.f.)</i>	17
4.1.	<i>Reducción de consumo energético de plantas de ósmosis inversa. Se indica el menor consumo reportado en cada periodo (Panagopoulos & Haralambous, 2020).</i>	31
4.2.	<i>Comparación emisiones de gases de efecto invernadero por m³ de agua desalinizada usando combustibles fósiles y energías renovables (Panagopoulos & Haralambous, 2020).</i>	32
6.1.	<i>Diagrama de sistema de desalinización por ósmosis inversa modelado. Elaboración propia</i>	45
7.1.	<i>Gráfico producción de agua v/s energía ultrafiltración. Elaboración propia.</i>	59
7.2.	<i>Gráfico producción de agua v/s energía Ósmosis inversa. Elaboración propia.</i>	60
7.3.	<i>Gráfico Membranas de Ultrafiltración v/s Agua producida. Elaboración propia.</i>	61
7.4.	<i>Gráfico Membranas de Ósmosis Inversa v/s Agua producida. Elaboración propia.</i>	62
7.5.	<i>Dosificación mensual de H₂SO₄ para distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia.</i>	63

7.6.	(a) Dosificación mensual de NaOCl para distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (b) Dosificación mensual de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ para distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (c) Dosificación mensual de $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ para distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia.	64
7.7.	(a) Dosificación de ácido cítrico para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (b) Dosificación de ácido clorhídrico para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (c) Dosificación de hipoclorito de sodio para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (d) Dosificación de hidróxido de sodio para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia.	66
7.8.	(a) Dosificación de HCl para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (b) Dosificación de NaOCl para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia.	68
7.9.	Químicos necesarios diariamente para potabilizar el agua	71
7.10.	Químicos necesarios diariamente para agua para minería	72
7.11.	Químicos necesarios diariamente para agua para agricultura	73
8.1.	Comparación distintos métodos. Elaboración propia.	78

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, la escasez hídrica representa un importante desafío para la sociedad a nivel mundial. Actualmente, 2200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros, y para el año 2022, 3500 millones aún carecían de servicios de saneamiento gestionados de manera segura. Este problema afecta a todos los continentes, y se estima que alrededor de 400,000 muertes de menores de 5 años podrían evitarse de manera anual si tuvieran acceso a mejores condiciones de agua, saneamiento e higiene (Naciones Unidas, 2023).

En el año 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el derecho humano al agua y al saneamiento. En esta declaración se destaca la importancia del acceso equitativo al agua potable y al saneamiento como un derecho humano esencial. Se reafirma la responsabilidad de los estados en promover y proteger los derechos humanos, incluido el acceso de todos sus ciudadanos al agua potable y a sistemas de saneamiento adecuados (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2010).

Sin embargo, de acuerdo con el World Resources Institute (2023), al menos el 50 % de la población vive bajo condiciones de estrés hídrico durante al menos un mes al año, afectando sus vidas, trabajos, alimentación y seguridad energética.

En Chile la situación es la misma, con el país liderando la crisis hídrica en América Latina, al año 2022 el 53 % de las comunas del país habían sido declaradas en escasez hídrica (Alvarado & de la Vega Planet, 2022). Como se puede ver en el mapa de la figura 1.1, Chile está bajo un estrés hídrico extremadamente alto, es el único país sudamericano en esa categoría, y según el World Resources Institute (2023), en el ranking de estrés hídrico se encuentra en el lugar número 16.

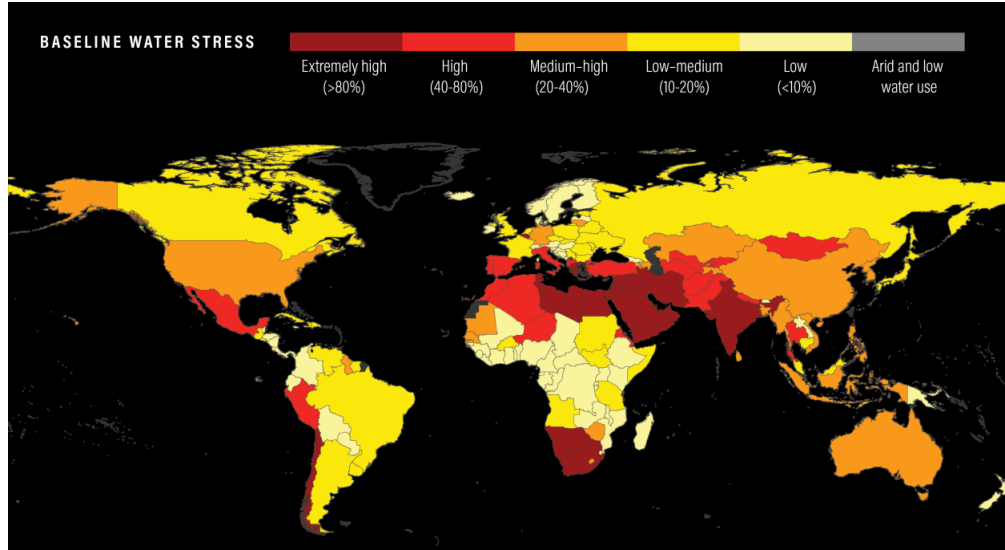


Figura 1.1: *Estrés hídrico en el mundo* (Kuzma et al., 2023)

El agua es necesaria no solo para el consumo humano, sino para el desarrollo y para la vida en general. Se necesita agua para el riego, y con ello para la producción de alimentos, y para los procesos industriales que pueden generar trabajos y desarrollo. Entonces, el acceso al agua es fundamental en todas las áreas de la vida humana.

Sin embargo, el acceso al agua resulta imposible ante la falta de agua, y a medida que la humanidad crece y se desarrolla, la necesidad de agua aumenta. Por lo tanto, se deben buscar nuevos métodos para su obtención. Si bien existen necesidades que pueden ser satisfechas de manera directa por el agua de mar o de río, sin necesidad de tratamiento, tales como ciertos sistemas de saneamiento que usan agua salada, enfriamiento de equipos o incluso para tratamiento de aguas (Fundación Aquae, 2021a), esta agua no puede ser utilizada como agua potable, ni agua de riego, y en muchos casos tampoco como agua para la industria, dependiendo del proceso, ya que debido a sus características puede ser dañina y no sirve para estos usos. Sin embargo, el agua de mar puede ser tratada, de manera que sí pueda ser utilizada en esas áreas (Fundación Aquae, 2021b).

Existen diversos métodos de desalinización, los cuales pueden ser una buena fuente de agua para los distintos usos de la comunidad, ya que gran parte de las comunidades con problemas de agua tienen acceso a la costa, aguas de pozo o aguas subterráneas. Los métodos de desalinización se pueden separar en desalinización térmica y desalinización por membrana. El primero se basa principalmente en cambios de temperatura que causan cambios de fase en el agua, logrando separarla de los solutos. Mientras que la desalinización por membrana se basa en una separación física de los solutos y el agua, esto mediante membranas semipermeables que permiten el paso del agua, mientras impiden el paso de la sal y otros solutos (Salinas-Freire et al., 2021; Voutchkov, 2013).

En los métodos de desalinización térmica tenemos (Salinas-Freire et al., 2021):

1. Destilación multi-efecto.
2. Evaporación multi-etapa.
3. Compresión de vapor.
4. Congelación

Mientras que en los métodos de desalinización por membrana tenemos (Salinas-Freire et al., 2021):

1. Ósmosis inversa.
2. Electrodialisis.
3. Destilación por membrana.
4. Cristalización por membrana.

Sin embargo, la ósmosis inversa es el método de desalinización más usado a nivel mundial, esto ya que, a pesar de necesitar una alta cantidad de energía para el proceso, tiene una alta eficiencia y un bajo costo respecto a otros métodos (Behnam et al., 2022).

En Chile, en la zona norte se encuentran algunos de los lugares más secos del mundo, por lo cual la zona ha tenido relevancia en el desarrollo de la desalinización, y Chile estuvo entre los primeros países en aplicar las tecnologías de desalinización alrededor de 1858 (Comité Científico de Cambio Climático, 2022).

Chile es un país minero, y en los años noventa la industria minera, ante la necesidad de agua, empieza a usar agua de mar, sin embargo esta tiene consecuencias negativas en los equipos, por lo que se siguen desarrollando tecnologías de desalinización (Comité Científico de Cambio Climático, 2022).

Al año 2022 Chile contaba con 38 plantas desalinizadoras operativas, si bien la mayor concentración de estas se encontraba en el norte del país, para ayudar frente a la sequía, estas se encontraban repartidas a lo largo del país (Comité Científico de Cambio Climático, 2022). En el mapa de la figura 1.2 se puede observar la repartición de plantas desalinizadoras a lo largo del país.

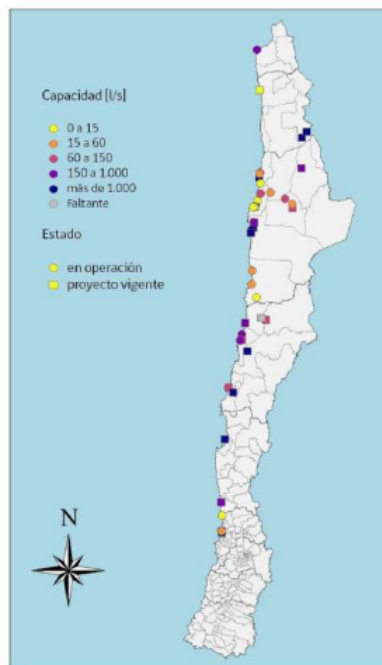


Figura 1.2: *Mapa de desalinizadoras en Chile. (Comité Científico de Cambio Climático, 2022)*

Estas desalinizadoras funcionan principalmente para cumplir con requerimientos de agua para minería, actualmente, del agua producida en Chile por desalinización, 6137[l/s] van a minería, mientras 1908[l/s] son utilizados con fines sanitarios, y 513[l/s] son utilizados para la industria, y se espera que estas cifras sigan aumentando.

Es por esto que el estudio del impacto ambiental y los consumos de energía y materiales en las plantas de ósmosis inversa resulta sumamente importante, puesto que, como fue previamente mencionado, es el método principal de desalinización a nivel mundial. Si bien estas plantas pueden tener un papel vital para entregar agua a las comunidades, su funcionamiento podría tener consecuencias significativas en el medio ambiente. Es por ello que tiene gran importancia el análisis de sus impactos ambientales y de sus consumos de energía y materiales, para poder comprender cómo operar las plantas de la mejor manera posible, minimizando los daños al medio ambiente y optimizando su eficiencia para garantizar la sostenibilidad del proceso a largo plazo.

Al realizar el estudio es importante también recordar que existen distintos tamaños de plantas desalinizadoras, puesto que estas pueden variar según las necesidades que vayan a cubrir. Se deben considerar los distintos tamaños de planta, ya que las condiciones operativas, los consumos y los impactos de estas podrían variar de manera significativa según la escala de la planta, pudiendo enfrentar necesidades únicas según sus dimensiones y su producción. La relación podría no ser lineal, y al examinar una amplia gama de tamaños se puede comprender de manera más completa

las distintas implicaciones ambientales y energéticas en los diferentes contextos.

El estudio detallado de los impactos ambientales y los consumos de energía, químicos y materiales en las plantas de desalinización, especialmente en las que funcionan mediante ósmosis inversa, es esencial para enfrentar la creciente escasez hídrica y poder garantizar cada vez un mayor acceso equitativo y sostenible al agua a nivel mundial, pero a su vez, para poder proporcionar una base fundamentada para la toma de decisiones informadas, analizar el por qué la ósmosis inversa es el método más utilizado, optimizar la eficiencia de las plantas, minimizar sus impactos negativos y asegurar la disponibilidad hídrica para las generaciones presentes y futuras. Es por ello que se debe seguir investigando y desarrollando tecnologías innovadoras en el campo de la desalinización, para poder ir abordando de manera efectiva los desafíos globales respecto al agua y promover un futuro más sostenible para todos.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo General

Llevar a cabo una evaluación cuantitativa de los consumos de materiales y energía en plantas desalinizadoras de agua de mar mediante el proceso de ósmosis inversa, abordando y comparando desalinizadoras de distintos tamaños en aguas de mar de dos regiones distintas.

2.2. Objetivos Específicos

- Analizar el consumo energético asociado a las plantas de desalinización por ósmosis inversa, identificando la relación entre el tamaño de las plantas y su consumo energético, además de reconocer las implicaciones de este consumo energético.
- Evaluar cuantitativamente los materiales utilizados para el funcionamiento de las plantas, tales como membranas y productos químicos.
- Analizar el consumo de productos químicos necesarios para acondicionar el agua con distintos propósitos, tales como minería, consumo humano y agricultura.
- Identificar impactos ambientales y elaborar recomendaciones específicas de sostenibilidad.

Capítulo 3

Antecedentes de la Desalinización de Agua de Mar Mediante Ósmosis Inversa

3.1. Principios Físicos y Químicos detrás de la Ósmosis Inversa

La ósmosis es un proceso de desmineralización en el cual una membrana semipermeable separa sólidos disueltos en un líquido. La membrana permite el paso del líquido y algunos iones, pero bloquea la mayoría de los sólidos, iones y otros elementos disueltos (Kucera, 2010).

En la ósmosis natural, el agua fluye a través de una membrana semipermeable desde una solución con baja concentración de sólidos disueltos hacia una con alta concentración. La membrana permite el paso del agua y algunos iones, pero no de la mayoría de los sólidos disueltos. El agua sigue fluyendo hasta que la concentración se iguala en ambos lados (Kucera, 2010).

En el caso de la ósmosis inversa, como su nombre lo indica, el proceso ocurre al revés, el agua se mueve a través de la membrana semipermeable, pero pasa desde el lado con una mayor concentración de sólidos, iones, contaminantes u otros solutos, hacia el lado de menor concentración (Kucera, 2010).

3.1.1. Principios Físicos de la Ósmosis Inversa

El proceso de ósmosis inversa tiene ciertos conceptos físicos involucrados para poder ser llevado a cabo con éxito. Estos serán detallados a continuación.

Presión Osmótica

Es la presión aplicada sobre la superficie de una membrana semipermeable debido al transporte del agua desde el lado con mayor concentración de solutos u otros, hacia el lado con menor concentración (Voutchkov, 2013).

La presión osmótica es crucial durante el proceso de ósmosis natural, ya que detiene el flujo y equilibra el paso del agua hacia ambos lados de la membrana. Esta presión depende de la solución y su concentración de solutos (Wang et al., 2011).

Presión de Trabajo

Para el proceso de ósmosis inversa, se aplica una presión de trabajo, que es mayor que la presión osmótica, sobre el lado de la membrana con alta concentración de solución. Esto obliga al agua a pasar a través de la membrana hacia el lado con menor concentración de soluto, funcionando así de manera opuesta a la ósmosis natural. De esta manera, el proceso produce agua purificada o desmineralizada mientras las membranas retienen sólidos, sales inorgánicas, contaminantes, sustancias orgánicas, microorganismos y otros componentes presentes en el agua (Kucera, 2010; Wang et al., 2011). Para vencer la presión osmótica, las presiones de trabajo en la ósmosis inversa deben ser significativamente mayores (Wang et al., 2011).

Flux

El flux en las membranas de ósmosis inversa y ultrafiltración se refiere a la tasa de flujo de líquido que se produce por cada 1 $[m^2]$ de área de membrana en una hora (Water Projects Engineering & Construction, 2020).

El flux se mide en [LMH], o litros por metro cuadrado por hora, y es un parámetro fundamental a considerar al momento de diseñar un sistema de ultrafiltración o de ósmosis inversa (Water Projects Engineering & Construction, 2020).

Es una variable que varía según la membrana y el proceso, teniendo, por ejemplo, flux distintos en el caso de la ósmosis inversa y la ultrafiltración. El valor establecido para cada membrana es entregado por el fabricante (Wang et al., 2011; Water Projects Engineering & Construction, 2020).

Energía Específica

La energía específica es la energía necesaria o usada por unidad de masa o volumen de agua producida (Çengel & Turner, 2004).

Permeabilidad

La permeabilidad puede definirse como la relación entre el flux de la membrana y la diferencia de presión entre ambos lados de la membrana. Se mide en [LMH/bar] (Voutchkov, 2013).

La permeabilidad define la capacidad de un material para permitir el paso de ciertas sustancias. En el caso de las membranas, la permeabilidad determina qué sustancias pueden atravesar la membrana y cuáles no. Esta puede ser total, permitiendo el paso de todas las sustancias, o selectiva, permitiendo solo el paso de ciertas sustancias y bloqueando otras (Kucera, 2010).

3.1.2. Principios Químicos de la Ósmosis Inversa

El proceso de ósmosis inversa tiene una serie de conceptos químicos involucrados para poder ser llevado a cabo con éxito. Estos son detallados a continuación.

Diferencia de Concentración

La diferencia de concentración o gradiente de concentración, es la variación de concentración de una sustancia a través de un medio, en el caso de la ósmosis inversa, la diferencia de la concentración del agua a través de la membrana (Kucera, 2010).

La diferencia de concentración es la fuerza impulsora en el proceso de ósmosis natural, y mientras mayor sea, mayor será la fuerza impulsora del proceso (Kucera, 2010).

Membrana Semipermeable

Es un tipo de membrana, generalmente compuesta de poliamida, que permite el paso de ciertas moléculas o iones, mientras bloquea el paso de otros. En el caso de la ósmosis inversa, la membrana impide el paso de sales, iones y otros solutos, mientras permite el paso del agua, entregando un agua purificada (Kucera, 2010).

Las membranas de ósmosis inversa tienen una permeabilidad selectiva, esto quiere decir que permiten el paso de algunas sustancias, mientras bloquean el paso de otras, en este caso, las membranas de ósmosis inversa permiten el paso de líquido y de algunos iones, pero impiden el paso de la mayor parte de los sólidos y iones presentes en él, produciendo un agua purificada (Kucera, 2010).

Es importante que, aunque las membranas de ósmosis inversa pueden eliminar muchos sólidos y microorganismos debido a su permeabilidad, es importante eliminar los sólidos suspendidos antes de que alcancen las membranas para protegerlas de obstrucciones que afecten su eficacia (Voutchkov, 2013).

3.2. Proceso de Desalinización por Ósmosis Inversa

El proceso de desalinización por ósmosis inversa consta, en general, de cuatro fases: la captación del agua, el pre-tratamiento, la ósmosis inversa y, finalmente, la remineralización. Además, en el caso de que se esté produciendo agua potable, se debe agregar una cuarta fase, de desinfección.

El proceso se puede observar en la figura 3.1.

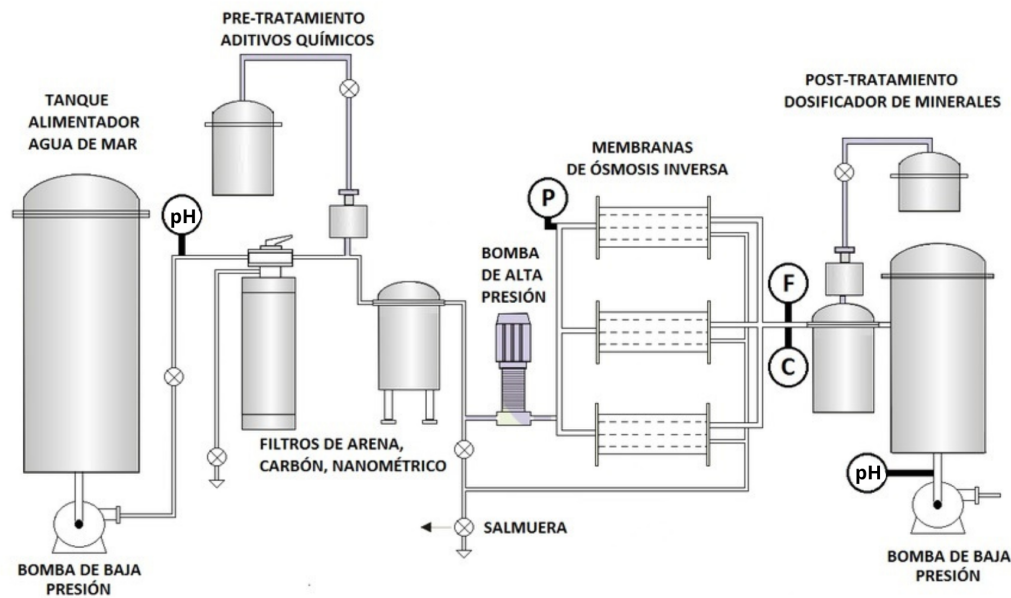


Figura 3.1: *Proceso de desalinización mediante ósmosis inversa (Aimone Arredondo, 2024).*

3.2.1. Captación de Agua

Para comenzar, se debe captar agua del mar. Este es el proceso donde se extrae agua del mar y se lleva hacia la planta, para poder usarla en el proceso. Para esto existen distintas infraestructuras de captación:

- **Captación en Pozo de Playa:** Para este tipo de captación es necesaria la construcción de un pozo en la playa, lo más cercano a la orilla del mar que sea posible. El pozo filtra el agua a través de la arena, de manera vertical. De esta manera, la arena actúa como un filtro natural, consiguiendo agua de menor turbidez. Además, tiene un menor impacto ambiental respecto a otros métodos de captación, ya que su forma de extracción tiene una menor afectación sobre la vida marina (Comisión Nacional del Agua, 2016; Wang et al., 2011).
- **Captación Superficial o Abierta:** Este tipo de captación, como su nombre lo indica,

extrae agua directamente de la superficie. Tiene como ventaja el hecho de ser más económica que las otras opciones, sin embargo, el agua extraída presenta un alto contenido de sólidos, partículas, algas, arena y otros (Wang et al., 2011).

- **Captación Sub-superficial o Profunda:** Se instala una tubería bajo el mar, la cual bombea agua desde el mar hacia la planta desalinizadora (Wang et al., 2011).

Las infraestructuras mencionadas se pueden ver en la figura 3.2.

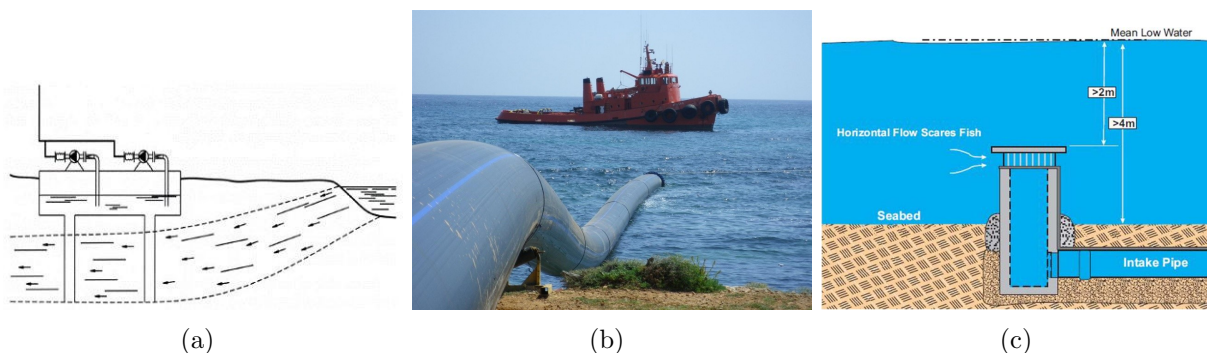


Figura 3.2: (a) Captación en pozo de playa (Comisión Nacional del Agua, 2016). (b) Captación superficial (De Miguel, 2016). (c) Captación sub-superficial (Missimer & Maliva, 2017)

Principales Equipos Necesarios para la Captación de Agua

Durante este proceso son necesarias tuberías y bombas de captación, mediante los cuales se lleva el agua desde la fuente hasta un tanque de almacenamiento que alimenta la planta (Curto et al., 2021).

- **Bombas de captación:** Para la captación de agua en estos procesos, pueden usarse bombas de eje vertical o motor sumergido. Estas bombas son capaces de captar caudales de hasta $80.000[\text{m}^3/\text{h}]$, y pueden operar a presiones de hasta $6[\text{bar}]$ (Sulzer, 2017). Estas bombas suelen tener un consumo de energía específica de $0,33[\text{KWh}/\text{m}^3]$ (Zarzo & Prats, 2018).

3.2.2. Pre-tratamiento

El pre-tratamiento es una fase sumamente importante en el proceso, ya que ayuda a preservar la calidad del agua, previene el ensuciamiento de las membranas y mejora la eficiencia del sistema (Ayoub et al., 2019).

Hay un pre-tratamiento físico, y un pre-tratamiento químico. En el primero, tenemos, en primer lugar, un tamiz, y luego tenemos la ultrafiltración, además, paralelamente, se agregan químicos al

agua, que cumplirán distintas funciones (Zúñiga E. et al., 2022).

Tamiz

El tamiz es una rejilla, es el primer paso en el pre-tratamiento, y retiene los materiales de mayor tamaño y grosor, permitiendo su eliminación e impidiendo que entren al proceso (Voutchkov, 2013).

Los tamices tienen agujeros de entre 200 y 500 [μm] que permiten el paso del agua, mientras impiden el paso de otros materiales, de esta manera se protege el sistema de posibles obstrucciones o daños que podrían causar estos materiales de mayor tamaño (Voutchkov, 2013). El detalle se puede ver en la figura 3.3.



Figura 3.3: *Tamiz* (COTECNO, 2022)

Ultrafiltración

Si bien el tamiz es un primer pre-tratamiento al agua de mar, para una mejor preservación de las membranas de ósmosis inversa, se usa también la ultrafiltración.

La ultrafiltración es un proceso que permite la remoción de partículas, microorganismos y la disminución de la turbidez del agua, ya que sus membranas presentan un tamaño de poro de entre 0.01 y 0.05 [μm]. En otras palabras, puede eliminar sólidos suspendidos y contaminantes de mayor tamaño antes del proceso de ósmosis inversa, lo que permite reducir el riesgo de daño a dichas membranas (Voutchkov, 2013).

Además de sus beneficios en términos de rendimiento, la ultrafiltración se caracteriza por su menor costo, menor consumo energético, que no llega a 1[kwh/ m^3] y requisitos de mantenimiento reducidos en comparación con los sistemas de ósmosis inversa. Por ende, su implementación previa a la

ósmosis inversa no solo contribuye a una mejora general en la eficiencia del proceso, sino que también resulta en ahorros significativos y en la disminución de posibles daños que podrían ocurrir si se empleara directamente la ósmosis inversa (Carbotecnia, 2024).

Químicos

Los químicos usados durante el pre-tratamiento pueden variar según las condiciones del agua, el acceso y la economía.

Los químicos son usados para cumplir ciertas funciones, las cuales son:

1. **Ajuste de pH:** Para mejorar el proceso y proteger las membranas durante el mismo, así como para mejorar la remoción de boro, que es tóxico para las personas, es necesario ajustar el pH del agua a un nivel adecuado (Mancilla-Villa et al., 2014; Wang et al., 2011).
Las membranas necesitan estar a un pH neutro para funcionar adecuadamente y no dañarse. Para lograr esto, se emplean diversos químicos, dependiendo de si se necesita aumentar o disminuir el pH. Idealmente, el pH del agua de entrada al proceso debe estar lo más cercano posible a 7, y el ajuste se realiza en función de este objetivo (Voutchkov, 2013).
2. **Desinfección:** La desinfección es sumamente importante, ya que disminuye la actividad biológica en el agua, lo que protege las membranas, tuberías, y otros presentes en el proceso, ya que evita el crecimiento y proliferación de los microorganismos en todos estos (Zúñiga E. et al., 2022). Para la desinfección se debe usar algún reactivo oxidante (Zúñiga E. et al., 2022).
3. **Descloración:** Para la desinfección suelen usarse reactivos oxidantes con cloro, y si bien la desinfección es un paso sumamente importante, las membranas de ósmosis inversa se deterioran rápidamente con la presencia de cloro, por ello se hace fundamental la descloración (Zúñiga E. et al., 2022).
Para el proceso de descloración se puede usar algún bisulfito, o también puede usarse algún filtro que absorba el cloro del agua, evitando su llegada a las membranas de ósmosis inversa (Zúñiga E. et al., 2022).
4. **Anti-incrustación:** El agua de mar contiene una diversos minerales, los cuales, bajo ciertas condiciones, precipitan, generando incrustación, y así dañando tuberías y membranas, es por esto que se agregan anti-incrustantes, los cuales inhiben la precipitación de los minerales, evitando así los daños en membranas y tuberías (Voutchkov, 2013).
Para este proceso se utilizan reactivos dispersantes, el anti-incrustante específico varía según el agua y los minerales presentes en esta, pero debe ser químicamente compatible con las

membranas (Zúñiga E. et al., 2022).

Principales Elementos y Equipos Necesarios en el Pre-tratamiento

Durante el pre-tratamiento son necesarias diversas tuberías y bombas, sin embargo, los principales equipos del proceso son los ocupados durante a ultrafiltración, los cuales se detallan a continuación:

- **Membranas de Ultrafiltración:** Las membranas de ultrafiltración son una estructura porosa y semipermeable, que consta de poros de un tamaño entre $0.01\text{--}0.05[\mu\text{m}]$. Estas membranas están diseñadas para filtrar materia particulada, y funcionan según el tamaño de los poros y las partículas presentes en el agua, dejando pasar el material de un menor tamaño que los poros, también pueden retener moléculas según su peso molecular, en lugar de según su tamaño. Son una barrera absoluta para partículas, bacterias, moléculas orgánicas de alto peso molecular, aceites emulsionados, coloides y patógenos resistentes al cloro (Wang et al., 2011).

En el comercio, las membranas de ultrafiltración tienen distintas configuraciones, pueden ser fibras, tubos, láminas planas apiladas en marcos o enrolladas en espiral. Las más comunes son las membranas de fibra hueca, y sus diámetros que van entre los 0.2 y $2.0[\text{mm}]$, mientras el material más común es el polimérico (Solís-Carvajal et al., 2017). El detalle de estas membranas se puede ver en la figura 3.4

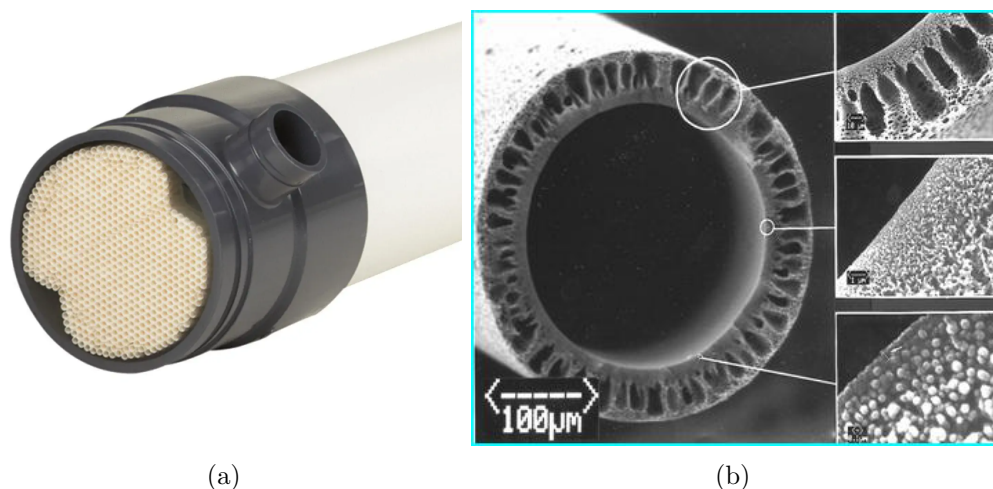


Figura 3.4: (a) Membrana de ultrafiltración fibra hueca (PENTAIR, 2019). (b) Detalle fibra hueca (Solís-Carvajal et al., 2017).

Las membranas se separan en módulos, lo cual facilita el proceso, maximizando la eficiencia y productividad de este. Dentro de cada módulo hay una cantidad determinada de membranas, dependiendo del flux, que en el caso de la ultrafiltración no debe superar los $55[\text{LMH}]$

(Voutchkov, 2013). En la figura 3.5 se pueden observar módulos de ultrafiltración, los cuales, entre diversos usos, también pueden ser usados para el pre-tratamiento en plantas desalinizadoras.



Figura 3.5: Módulos de ultrafiltración (Pure Aqua, Inc., s.f.)

Las membranas pueden limpiarse de manera periódica al ser lavadas en el sentido contrario a la filtración, con distintos químicos de limpieza, como ácidos, bases, cloro e hidróxido de sodio, disueltos en agua tratada del proceso, esto reduce su necesidad de un pre-tratamiento extenso (Wang et al., 2011).

- **Bombas de Alimentación:** Durante el proceso, las bombas alimentan el agua a través de la membrana de ultrafiltración, esto con la presión adecuada, de hasta 3[bar], para asegurar un flujo constante, permitiendo así que los contaminantes sean retenidos, mientras el agua pasa por los poros de la membrana, purificándose (Delta Filtration, 2022; Wang et al., 2011).

Además, las bombas son necesarias para el lavado de las membranas, para eliminar contaminantes acumulados en la superficie, prolongando su vida útil (Wang et al., 2011).

3.2.3. Tratamiento

El tratamiento de este proceso es la ósmosis inversa, si bien existen diversos métodos de desalinización, la ósmosis inversa es el método más utilizado, y el que se analiza en este trabajo (Iberdrola, 2021).

La ósmosis inversa es un proceso de desalinización que utiliza membranas semipermeables y bombas de alta presión para generar agua purificada. Durante el proceso el agua de mar, posterior a su pre-tratamiento, es sometida a una alta presión, la presión de trabajo, que vence a la presión osmótica y permite la desalinización al pasar por una membrana semipermeable que retiene los iones, moléculas, microorganismos, bacterias, virus y otros compuestos presentes en el agua, permitiendo únicamente el paso del agua por la membrana (Voutchkov, 2013).

De esta manera se obtiene el agua purificada, separada del concentrado de sales y otras impurezas.

Dentro del proceso están las etapas y pasos, los cuales se definen a continuación (Wang et al., 2011):

- **Etapas:** Una etapa es un conjunto de "pressure vessels", o recipientes a presión, que son los contenedores diseñados para contener las membranas semipermeables utilizadas en los sistemas de ósmosis inversa, operando en paralelo de manera simultánea.
- **Pasos:** Es la cantidad de veces que el agua pasa por membranas de ósmosis inversa, es decir, un paso, es que pasa por las membranas una vez, dos pasos es que el agua ya tratada pasa a una siguiente etapa, y así.

En el caso de la ósmosis inversa con agua de mar, el proceso siempre tiene una etapa y un paso (Wang et al., 2011).

Principales Elementos y Equipos Necesarios en el Tratamiento

Los principales equipos del proceso de ósmosis inversa se describirán a continuación:

- **Membranas de Ósmosis Inversa:** En el proceso de desalinización son usadas membranas de ósmosis inversa, membranas semipermeables, que funcionan al aplicar presión sobre la solución, forzando el paso del agua por las membranas, mientras los solutos se retienen (Wang et al., 2011)

Estas membranas tienen una estructura polimérica no porosa en su superficie, este polímero es la poliamida, que consiste en una red polimérica en la que los solutos pueden estar disueltos. Las membranas funcionan mediante un proceso de transporte controlado por su permeabilidad, la que permite que solo algunas pequeñas moléculas, como el agua, se transporten por la membrana, mientras otras sustancias, como los iones y sólidos son rechazadas (Voutchkov, 2013). El detalle de la membrana se puede observar en la figura 3.6.

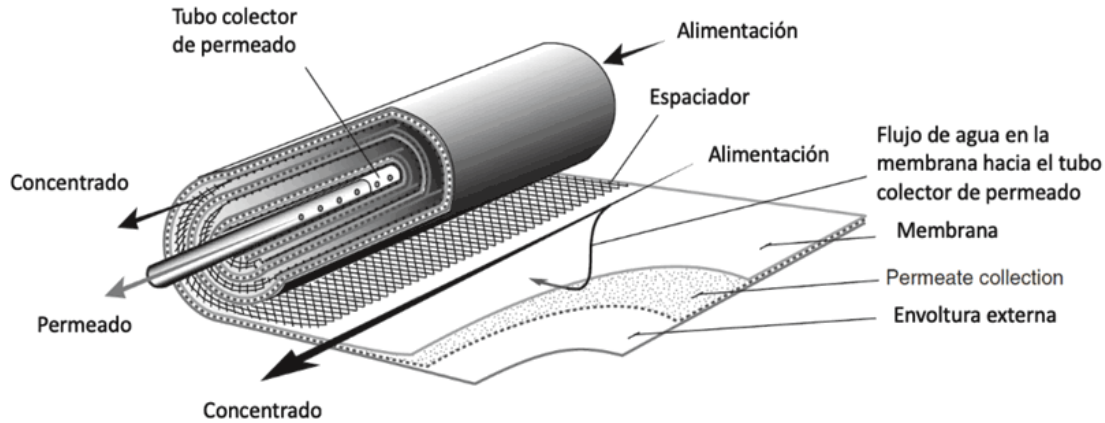


Figura 3.6: *Membrana de ósmosis inversa (Carbotecnia.info, s.f.)*

Su principal diferencia con las membranas de ultrafiltración es el tamaño de poro, ya que pueden tener poros de menos de $0,002[\mu\text{m}]$, lo cual hace su proceso de filtración más efectivo, rechazando una mayor cantidad de contaminantes (Voutchkov, 2013).

El proceso es impulsado por una fuerte presión aplicada sobre la membrana, que permite el transporte del agua a través de la membrana (Voutchkov, 2013).

- **Bomba de Alta Presión:** Como fue mencionado previamente, para que el proceso pueda ser llevado a cabo, se requiere de una presión aplicada sobre las membranas, la presión de trabajo, la cual debe ser superior a la presión osmótica (Wang et al., 2011).

Para aplicar la presión de trabajo son utilizadas bombas de alta presión, estas son capaces de generar la presión suficiente para llevar a cabo el proceso, la cual puede variar según el tipo de agua que se esté tratando, para agua dulce necesitan entre 5 y 25[bar], mientras que para agua de mar necesitan entre 55 y 75[bar], sin embargo, al trabajar con altas presiones necesitan de una gran cantidad de energía, generando un alto consumo energético durante el proceso de ósmosis inversa (Voutchkov, 2013; Wang et al., 2011).

- **Dispositivos de Recuperación de Energía:** Son equipos usados normalmente en la desalinización de agua de mar, con el fin de recuperar energía de la presión del concentrado. Los dispositivos recuperan la energía liberada durante el proceso, disminuyendo el consumo de energía total del sistema (Nashed & Van Dang, 2022).

Estos dispositivos funcionan mediante la recuperación y posterior reutilización de la energía cinética, o de la presión del rechazo de la salmuera. Algunos de estos dispositivos son (Kadaj & Bosleman, 2018):

1. **Intercambiadores de presión:** Para funcionar usan la energía de la presión del flujo

de la salmuera para pre-acondicionar el agua de alimentación previo a su entrada en las membranas. El proceso consiste en varios canales donde se cruzan flujos de alimentación y de rechazo, permitiendo el intercambio de presión y así reduciendo la carga de las bombas de alta presión.

2. **Intercambiadores de energía:** Para funcionar capturan la energía cinética del flujo de la salmuera, y la transfieren al agua de alimentación. El proceso consiste en un intercambio de energía entre ambos flujos que reduce la energía necesaria para las bombas de alta presión. Los dispositivos pueden ser basados en un pistón, centrífugos y otros.
3. **Turbinas de presión:** Son turbinas que aprovechan la energía hidráulica del flujo de la salmuera, de esta manera generan energía mecánica que puede impulsar directamente bombas o generar electricidad.

3.2.4. Limpieza

Para cuidar y aumentar la vida útil de las membranas estas deben ser limpiadas de manera regular. Se realizan limpiezas químicas que se aseguran de cuidar y limpiar las membranas, para que estas funcionen de manera adecuada y tengan una mayor vida útil.

Para la limpieza de las membranas tenemos el proceso de Clean In Place (CIP) y de Chemically Enhanced Backwashing (CEB), los cuales se detallarán a continuación:

CIP

Es un proceso de limpieza química realizado in-situ a favor del flujo, tanto para las membranas de ultrafiltración como para las de ósmosis inversa. El proceso generalmente implica la recirculación de una solución de limpieza a través del sistema a una alta velocidad y alta temperatura, seguido de un ciclo de remojo, y finalmente un enjuague, para eliminar residuos de las soluciones de limpieza, para esto debe detenerse el funcionamiento de la planta, y los químicos de limpieza son disueltos en agua ya tratada, la cual también es usada para el enjuague, esto para evitar ensuciamiento a las membranas durante la limpieza. Luego de la limpieza el agua y los químicos son desechados con la descarga (Wang et al., 2011).

El proceso es realizado con una frecuencia variable de entre cada 1 y 6 meses, y tiene una duración de entre 30 y 60 minutos (Voutchkov, 2013)

Para el proceso pueden utilizarse distintos químicos, tales como ácidos, sanitizantes y bases, los cuales se diluyen en el agua tratada en el proceso, y luego se bombean por el sistema (Zúñiga E.

et al., 2022).

CEB

Es otro proceso de limpieza de las membranas, donde estas se sumergen en productos químicos de limpieza durante varios minutos, y luego se realiza un lavado a contracorriente o retrolavado (Voutchkov, 2013).

Las dosis de químicos necesarios pueden variar según los agentes contaminantes que predominen en las aguas de fuente, además de según el material y la configuración de las membranas (Voutchkov, 2013).

El proceso es realizado de manera diaria, con una duración de entre 20 y 30 minutos, para llevar a cabo el proceso debe pararse el funcionamiento de la planta, y luego los químicos de limpieza son disueltos en agua ya tratada, para evitar ensuciamiento de las membranas durante la limpieza, la cual también es usada para el enjuague. Luego de la limpieza el agua y los químicos son desechados junto con la descarga (Voutchkov, 2013).

Para el proceso se pueden utilizar distintos químicos, principalmente cloro, en las membranas de ultrafiltración, y algunos otros químicos de limpieza, como ácidos, bases, u otros (Voutchkov, 2013).

3.2.5. Post-tratamiento

La ósmosis inversa entrega un agua purificada, sin embargo, este agua, al eliminar la mayor parte de los minerales, elimina también aquellos que la neutralizan, generando sin minerales y con un pH ácido, es por ello que el agua debe ser sometida a un post-tratamiento, que consiste en una remineralización, neutralización y, cuando corresponda, desinfección (Pure Aqua, 2018).

Remineralización

La remineralización, como su nombre lo indica, es el proceso donde se agregan distintos minerales esenciales al agua purificada, esto para que el agua encuentre un equilibrio mineral, no sea corrosiva, y obtenga un pH neutro. En el caso del agua desalinizada, este proceso se hace necesario, ya que, como se mencionó previamente, el agua carece de minerales y suele tener un pH ácido, lo que la vuelve inestable, corrosiva, y potencialmente dañina tanto para la salud humana, ambiental, y para las tuberías y otros equipos por donde el agua se transporte (Voutchkov, 2013).

Existen distintos sistemas de remineralización, se pueden agregar los minerales en forma de sales, se puede mezclar el agua desalinizada con otras aguas, y también mediante el uso de lechos de calcita o dolomita. En el caso de plantas desalinizadoras se suelen usar estos últimos, donde al agua se le inyecta dióxido de carbono, y luego de ello entra al lecho, donde entra en contacto con piedras de calcita, las cuales suelen funcionar como un filtro. Al pasar el agua a través de las piedras, junto con el dióxido de carbono, ocurre un intercambio iónico, remineralizando el agua y neutralizando su pH, sin embargo, este método no entrega magnesio al agua, el cual es fundamental para el agua potable, por lo que, en el caso de agua para consumo humano, este debe añadirse aparte, luego de que el agua pase por el lecho, disolviendo sales de magnesio en el agua (Voutchkov, 2013).

Desinfección

La desinfección es el último paso del proceso, y es únicamente requerida en Chile para el agua potable, mientras el agua de regadío y el agua para procesos no requiere este paso (Zúñiga E. et al., 2022).

Durante el proceso de desinfección se busca inactivar patógenos, produciendo la menor cantidad posible de subproductos de desinfección. Generalmente el agua desalada tiene un contenido orgánico mas bajo que otras fuentes de aguas superficiales dulces, esto debido a que las membranas de ósmosis inversa rechazan la mayoría de los compuestos orgánicos presentes en el agua de alimentación (Voutchkov, 2013).

Para el proceso existen diversos métodos de desinfección, tales como (Zúñiga E. et al., 2022):

- Uso de agentes físicos, tales como luz ultravioleta (UV) y calor.
- Uso de medios mecánicos, tales como filtración del agua a una escala nanométrica.
- Uso de radiación.
- Uso de agentes químicos, tales como bromo, yodo, ozono, cloro, y otros.

Sin embargo, la ley establece el desinfectante que debe usarse como el cloro, el cual se aplica, generalmente, en forma de hipoclorito de sodio (Instituto Nacional de Normalización, 2005; Voutchkov, 2013).

Además, la ley chilena exige el agregar flúor al agua potable, esto para prevenir las caries dentales, y es agregado en forma de fluoruro de sodio (NaF) (Subsecretaría de Redes Asistenciales, División de Control y Prevención de Enfermedades, Departamento de Salud Bucal, 2022).

Principales Equipos Necesarios en el Post-tratamiento

Durante el Post-tratamiento, se usan, al igual que en todo el proceso, bombas y tuberías, pero los principales equipos de esta parte del proceso son los utilizados durante la remineralización, y estos son los siguientes:

- **Disolvedor de CO_2 :** Para que la remineralización funcione de manera adecuada, el agua debe contar con CO_2 , pero, debido a la purificación, el agua de salida de la ósmosis inversa no cuenta con CO_2 , o al menos no con la cantidad necesaria de este. Es por ello que se hace necesario un disolvedor de CO_2 (DrinTec, 2018).

El equipo inyecta el CO_2 al agua desalinizada en forma de burbujas, las cuales, al entrar en contacto con el líquido se disuelven, debido a la diferencia de concentración entre las burbujas y el agua purificada, esto hasta encontrar un equilibrio (DrinTec, 2018).

Una vez que el líquido cuenta con la cantidad de CO_2 necesaria, que varía según las condiciones, está listo para entrar al lecho de remineralización.

- **Lecho de Calcita:** Funciona de manera similar a un filtro, y es el componente principal del sistema de remineralización. Para su funcionamiento, se hace pasar el agua desalinizada por el lecho. Este lecho está compuesto de gránulos de calcita, que es principalmente carbonato de calcio. Al estar en contacto con el agua, esta disuelve el carbonato de calcio, remineralizándose (Voutchkov, 2013).

3.2.6. Desechos

En el proceso se generan distintos desechos, el principal de estos es la salmuera. Por cada litro de agua generado se generan aproximadamente 1,5 litros de salmuera, esta también tiene químicos y otros productos presentes en el agua o agregados durante el tratamiento. Estos desechos comúnmente son diluidos, y vertidos de vuelta al mar (Sola et al., 2019).

3.2.7. Otros Equipos Necesarios en el Proceso

El proceso tiene otros equipos a lo largo de su realización, que ayudan a que el proceso pueda ser llevado a cabo con éxito. Dentro de estos equipos tenemos:

- **Bombas:** El proceso necesita de numerosas bombas, además de las ya mencionadas para funcionar, ya que estas se usan para mover el agua a lo largo de todo el sistema, y para administrar los distintos químicos (Wang et al., 2011).

- **Estanques de almacenamiento:** Necesarios para almacenar el agua entre procesos y/o para el almacenamiento de los químicos y desechos.
- **Válvulas:** Necesarias para controlar flujos de ingreso a diferentes etapas del proceso.
- **Tuberías:** Sumamente necesarias para el sistema, ya que son el medio por el cual se transportan los distintos líquidos.

3.3. Usos de agua de desalinización

Una vez desalinizada, el agua puede tener distintos usos que se detallan a continuación.

3.3.1. Agua para consumo humano

Con el transcurso de los años, la población mundial ha ido aumentando, incrementando así la necesidad del agua potable para consumo, mientras que la disponibilidad de este recurso ha ido disminuyendo debido al cambio climático, la contaminación y el ya mencionado crecimiento demográfico. El mayor problema de esto es que la escasez de agua potable puede tener consecuencias fatales para la población (Salinas-Freire et al., 2021).

En Chile, el consumo de agua potable mensual promedio por persona al año 2022 era de $17,06[m^3]$ (Gobierno de Chile; Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2022).

Dentro de este contexto, el uso de agua de mar, desalinizada, ha llegado a ser una solución, pudiendo ser una fuente de abastecimiento importante y accesible para la población mundial, ya que tiene una amplia disponibilidad, y con el paso de los años se han ido mejorando los métodos para la desalinización (Salinas-Freire et al., 2021).

Entonces, una vez tratada el agua de mar, desalinizada, remineralizada y desinfectada, es una buena fuente de agua potable, que puede ayudar a aliviar la necesidad del recurso para la población mundial.

3.3.2. Agua para mineras

La minería necesita del uso de agua para distintos procesos productivos, dentro de los que se identifican 5 distintas áreas (Comisión Chilena del Cobre, 2017):

1. **Área Mina:** Este área incluye la mina, y el transporte del material hacia el chancado primario. En este área el agua es principalmente utilizada para humedecer la zona, disminuyendo el polvo en los caminos, y en la extracción y bombeo durante labores subterráneas de la mina.

2. **Área Planta Concentradora:** Este área incluye el procesamiento de los minerales, y es el área que consume mayor cantidad de agua. En este área se involucra la trituración del mineral, luego la flotación, clasificación y espesamiento.
3. **Área Planta Hidrometalurgia:** Este área considera los procesos de lixiviación, la extracción por solvente y la electro-obtención para la producción de cátodos. En este área el principal consumo de agua es debido a la evaporación de las pilas de lixiviación.
4. **Área Fundición y Refinería:** En este área el concentrado seco es sometido a pirometalurgia para obtener placas gruesas en forma de ánodos, estas placas pueden comercializarse directamente o se puede refinar en celdas electrolíticas en una solución de ácido sulfúrico. El principal uso de agua es en las soluciones.
5. **Área Servicios:** Este área comprende el uso de agua para consumo de los trabajadores, ya sea en cocina, lavado, o baños. Este consumo resulta poco significativo con respecto a las otras áreas.

La última área entraría dentro del uso anterior de agua, que es el uso para consumo humano. Además de eso, la minería necesita de grandes cantidades de agua, por lo que cada vez más están buscando métodos para tener mayor acceso al agua. Dentro de estos métodos entra la desalinización, que les puede ayudar a obtener agua, tratándola solo hasta el punto necesario para su uso, lo cual podría disminuir costos.

En Chile, el año 2022 la minería del cobre utilizó un promedio de $18,07[m^3/s]$ de agua para sus operaciones (Comisión Chilena del Cobre, 2022a).

3.3.3. Agua para la agricultura

Ante la realidad mundial de escasez hídrica, resulta urgente la búsqueda de métodos para obtener agua que pueda ser destinada a la agricultura. Entre estas opciones, la desalinización del agua marina se presenta como una solución viable. El océano, un recurso abundante en el mundo, ofrece una fuente inagotable de agua que no está sujeta a las variaciones climáticas (Melgarejo & Fernández-Aracil, 2019).

La agricultura requiere volúmenes significativos de agua y desempeña un papel fundamental en la sustento humano, proporcionando gran parte de los alimentos consumidos. Por tanto, la desalinización podría ser un método eficaz para obtener agua de riego. Dentro del proceso existe la posibilidad de tratar el agua solo hasta el punto necesario para su uso, lo que podría resultar en una reducción de costos.

En Chile, la agricultura es el mayor consumidor de agua, usando el 73 % del recurso agua disponible (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2021).

Capítulo 4

Impactos de la Desalinización y Sostenibilidad

Si bien las plantas desalinizadoras pueden ser una solución, o al menos una ayuda frente a la escasez hídrica, es importante estudiar e informarse respecto a los impactos ambientales de estas, para evitar causar un mayor daño al buscar solucionar la situación.

Al analizar el impacto ambiental de las plantas desalinizadoras, para analizarlo será separado por partes, por un lado tenemos la captación de agua, por otro lado la descarga de la planta, luego los desechos de materiales, como las membranas, y finalmente, el consumo energético.

4.1. Impacto Ambiental

En primer lugar se definirá lo que es un impacto ambiental, este está definido en la ley Chilena como *“La alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada”* (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1994).

4.2. Captación

Los impactos ambientales de la captación de agua pueden ser variables dependiendo del tipo de captación usada.

Las tomas de agua suelen contar con algún sistema de cribado, que evita el ingreso de especies marinas y plantas en la toma de agua, minimizando impactos ambientales. La captación sub-

superficial y los pozos de captación requieren de un área de construcción considerable, además de la perturbación en el ambiente generada durante la construcción, sin embargo, presentan menos impactos que la captación superficial, ya que tienen menos interacción directa con el medio marino, generando un menor estrés en la flora y fauna de la zona, sin embargo esto puede variar según la ubicación específica y los seres vivos en esta (Elsaid et al., 2020).

En general sus principales impactos son los siguientes:

1. Remoción del área.
2. Estrés en los seres vivos cercanos.
3. Posible captación de seres vivos cercanos.

4.3. Descarga

Una de las principales componentes de la descarga en las plantas desalinizadoras es la salmuera, la cual está compuesta por la sal y otros minerales y solutos extraídos del agua, además de esta, la descarga tiene agua y dosis de los químicos utilizados durante el proceso.

La salmuera es un subproducto líquido generado durante el proceso de la desalinización, consiste en un concentrado de la sal y otros minerales, que queda al extraer el agua dulce, por ello está extremadamente concentrada (Voutchkov, 2013). Su composición varía según el método de desalinización usado, además de según el agua que fue desalinizada, pero en comparación con otros métodos, la ósmosis inversa produce una descarga con una mayor salinidad, esto debido a que presenta un mayor rechazo, retirando una mayor cantidad de sales y otros solutos del agua (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

La descarga puede resultar dañina para el medio ambiente debido a su alta salinidad, que alcanza a ser el doble que la del agua de mar, así como por los varios químicos utilizados durante el proceso, que también están presentes en la descarga (Panagopoulos & Haralambous, 2020). Además, los químicos presentes en ella, tales como los anti-incrustantes y otros utilizados para eliminar microorganismos y limpiar el agua, pueden resultar tóxicos para los organismos marinos (Sola et al., 2019).

Los principales parámetros a considerar de la descarga son la salinidad, los químicos desinfectantes, otros químicos agregados y los metales pesados (Elsaid et al., 2020).

4.3.1. Salinidad

Como ya se mencionó, la descarga tiene una alta salinidad, que alcanza a ser 1,6 veces más alta que la salinidad del agua de mar (Khan et al., 2021). Al estar en la descarga junto con agua y químicos, esta puede diluirse ligeramente, pero aún así conserva una salinidad considerablemente mayor que la del agua de mar. Esto puede tener los siguientes impactos ambientales (Elsaid et al., 2020):

- Alteración de las capas de agua y corrientes, debido a la diferencia de densidad.
- Aumento en la salinidad del agua y los sedimentos en la zona de descarga.
- Reducción en el oxígeno en el agua al reducir la solubilidad del oxígeno.
- Muerte de organismos acuáticos al sobrepasar su límite de salinidad.
- Cambios en la estructura y condiciones de la comunidad bentónica.
- Cambios en los ciclos de fotosíntesis, metabolismo y tasas de crecimiento.

4.3.2. Químicos desinfectantes

En la descarga también hay presentes químicos desinfectantes, usados para que el agua no tenga microorganismos que puedan resultar dañinos, y para cuidar las membranas. Esto puede tener los siguientes impactos ambientales (Elsaid et al., 2020):

- Mortalidad de organismos acuáticos.
- Cambios en el metabolismo y las tasas de crecimiento de los organismos acuáticos.

4.3.3. Aditivos químicos

En la descarga también hay presentes otros aditivos químicos usados en el proceso. Esto puede tener los siguientes impactos ambientales (Elsaid et al., 2020):

- Aumento en la turbidez del agua.
- Muerte de organismos acuáticos.
- Cambios en el metabolismo y las tasas de crecimiento de los organismos acuáticos.

4.3.4. Metales pesados

En la descarga también puede haber presencia de metales pesados producto de la corrosión, o que estuvieran ya presentes en pequeñas cantidades en el agua y se hayan concentrado por el proceso.

Esto puede tener los siguientes impactos ambientales (Elsaid et al., 2020):

- Aumento en la concentración de productos corrosivos.
- Muerte de organismos acuáticos.
- Cambios en el metabolismo y las tasas de crecimiento de los organismos acuáticos.

4.3.5. Disposición de la descarga

La descarga puede ser desechada de distintas maneras, y la magnitud del impacto ambiental dependerá de la forma de desecho. Las formas de desecho más comunes son (Panagopoulos & Haralambous, 2020):

1. **Descarga en el alcantarillado:** La descarga se vierte en el sistema de alcantarillado. El principal problema con este método es que la alta salinidad inhibe el crecimiento bacteriano en las plantas de tratamiento, impidiendo o disminuyendo la efectividad en el tratamiento de las aguas residuales.
2. **Estanque de evaporación:** La descarga se evapora en un estanque, luego de evaporar el agua las sales y otros sólidos son recogidos y desechados como residuos sólidos. El principal problema con este método es que causa contaminación de aguas subterráneas y aumenta la salinidad del suelo.
3. **Descarga de agua superficial:** Este es el método más usado debido a su bajo costo (entre 0,05 y 0,3 dólares por cada metro cúbico de descarga). En este método la descarga es disuelta en agua para bajar su concentración, y luego es desechada en aguas superficiales. El principal problema con este método es que produce contaminación en el ecosistema marino.
4. **Inyección en pozo profundo:** En este método la descarga es inyectada en formaciones rocosas porosas bajo tierra. El principal problema con este método es que causa contaminación de aguas subterráneas y aumenta la salinidad del suelo.
5. **Aplicación en el suelo:** La descarga es usada para riego de cultivos con una alta tolerancia a la sal. El principal problema con este método es que aumenta la salinidad del suelo.

4.3.6. Otros usos para la descarga

Existen usos que se le pueden dar a la descarga, para disminuir el impacto ambiental, aumentando la sostenibilidad e incluso pudiendo generar un ingreso, estos usos, en su mayoría, aún están en estudio, sin embargo podrían ser una solución importante para evitar la contaminación que puede producir la descarga. Algunos de estos posibles usos son (Soliman et al., 2021):

1. **Producción de hidróxido de sodio y ácido clorhídrico:** Nuevos estudios han probado que a partir de la salmuera se pueden producir químicos que pueden ser usados dentro del mismo proceso de desalinización. Esto por un proceso llamado electrodiálisis de membrana bipolar, donde el hidróxido de sodio y el ácido clorhídrico son aislados del cátodo y el ánodo por medio de una membrana. Actualmente este método no es usado a escala industrial por la complejidad de su diseño y el alto costo de sus materiales, sin embargo, si se sigue estudiando podría llegar a ser una buena solución para evitar la contaminación producida por la descarga.
2. **Uso para enfriamiento:** Normalmente para los procesos de enfriamiento es usada agua o algún líquido refrigerante, sin embargo, el uso de la descarga para esto ahorraría grandes cantidades de agua, sin embargo se requeriría de algún proceso de limpieza para disminuir la corrosión e incrustaciones.

4.4. Desechos de Materiales

Las plantas de ósmosis inversa tienen una vida útil mayor 30 años, mientras que sus membranas tienen una vida útil de entre 5 y 10 años, y las membranas de ósmosis inversa tienen una vida de aproximadamente 5 años, aunque esta vida útil puede variar según las condiciones del agua de entrada, el pre-tratamiento y el cuidado y mantenimiento a la membrana (Senán-Salinas et al., 2019; Yu et al., 2021).

La diferencia de la vida útil de las membranas y de las plantas hace inevitable que durante el tiempo de operación de la planta estas deban ser reemplazadas un mínimo de 3 veces, bajo la condiciones más ideales, y probablemente en la realidad una mayor cantidad de veces (Senán-Salinas et al., 2019; Wang et al., 2011).

Una vez que las membranas ya no pueden continuar cumpliendo su función, deben ser reemplazadas, generando una gran cantidad de residuos que terminan en vertederos (León-Zerpa et al., 2021).

Actualmente la disposición final de las membranas es problemática, se calcula que anualmente, a nivel mundial, se desechan unas 840000 membranas, que alcanzan un peso de 14000 toneladas. Estas son generalmente desechadas de acuerdo con las regulaciones de cada país, pero su vida acaba generalmente en incineración o disposición en vertederos, lo cual tiene un impacto ambiental considerable, ya que las membranas están hechas de derivados de combustibles fósiles (Khanzada et al., 2024).

Al disponer las membranas en vertederos, su degradación toma varios años, y al ser incinerada, los derivados de los combustibles fósiles y otros componentes plásticos de las membranas producen gases de efecto invernadero y otros subproductos tóxicos que pueden ser cancerígenos, causando riesgos para la salud humana (Khanzada et al., 2024).

4.4.1. Segunda vida para membranas de ósmosis inversa

Existen otros usos que se les pueden dar a las membranas cuando ya no pueden cumplir su función inicial, alargando su tiempo de vida y disminuyendo la cantidad de residuos generados. Algunos de estos usos son (León-Zerpa et al., 2021):

1. Segunda vida como membranas para tratamientos terciarios de plantas de aguas residuales. Deben ser tratamientos que no requieran una calidad muy exigente del permeado, como agua para regadío o para devolver al mar. Eventualmente la membrana no se podrá seguir usando, pero habrá sido aprovechada de manera completa.
2. Uso de las membranas para concentración de lixiviado de basurales. Al ser un proceso que ensucia mucho las membranas, no suele ser rentable, pero el uso de un desecho disminuye costos posibilitando el tratamiento.

4.4.2. Reciclaje de membranas de ósmosis inversa

Cuando llega el momento de la disposición final de las membranas, en lugar de que estas sean desechadas en vertederos o incineradas, una opción con un menor impacto ambiental es el reciclaje, ya que reduce los desechos, y reutiliza los materiales para hacer nuevas membranas.

Para comenzar el proceso de reciclaje, en primer lugar se deben recuperar las membranas de ósmosis inversas desechadas, que presentan acumulación de incrustaciones, y los módulos de membranas. Las membranas son sometidas a un proceso de limpieza con cloro libre, el cual degrada la poliamida de las membranas (Contreras-Martínez et al., 2021).

En el proceso de limpieza las membranas son sometidas a distintas soluciones de hipoclorito de sodio u otros oxidantes. El proceso elimina la poliamida y aumenta el tamaño de poro, estas membranas recicladas pueden ser reutilizadas en aplicaciones de nanofiltración o ultrafiltración, o en procesos de tratamiento de aguas residuales. Luego de este proceso se puede llevar a cabo una etapa adicional de polimerización, donde se reaplica una capa delgada de poliamida o polietileno para mejorar su rendimiento al mejorar su permeabilidad y selectividad, pudiendo llegar a incluso reusarse como membranas de ósmosis (Contreras-Martínez et al., 2021).

4.5. Consumo energético

La desalinización es una tecnología que requiere de un alto consumo energético, ya que se usa para la operación de los equipos, el transporte de los productos utilizados, iluminación, etc. Este consumo puede tener un mayor o menor impacto ambiental dependiendo de la matriz energética, ya que el uso de combustibles fósiles está asociado a la emisión de gases de efecto invernadero, material particulado y otros contaminantes (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

Desde que se empezó a usar la desalinización a nivel industrial, el consumo energético ha sido uno de los mayores obstáculos. La tecnología de membranas en general requiere de un alto consumo energético, y en la actualidad este requerimiento energético suele ser satisfecho por combustibles fósiles, resultando en impactos significativos al medio ambiente (Kucera, 2019).

A pesar de esto, en los últimos años se han ido mejorando las tecnologías, reduciendo considerablemente la energía utilizada por el proceso de ósmosis inversa, como se puede ver en el gráfico de la figura 4.1. Esta disminución en los consumos se atribuye principalmente al uso de elementos de recuperación de energía (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

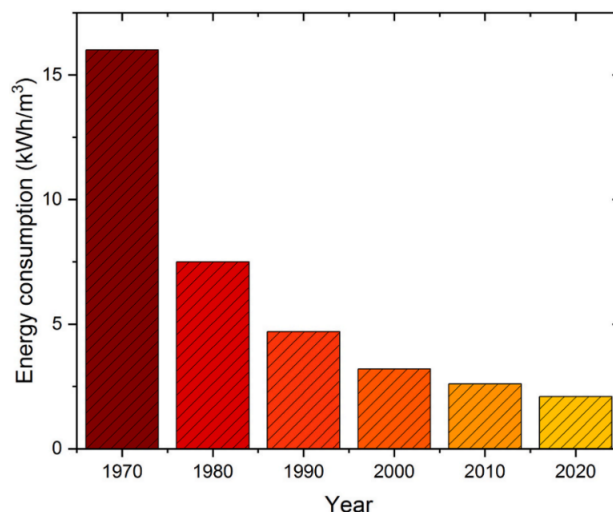


Figura 4.1: Reducción de consumo energético de plantas de ósmosis inversa. Se indica el menor consumo reportado en cada periodo (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

4.5.1. Dispositivos de Recuperación de Energía

En general estos dispositivos ocupan la energía del flujo de la salmuera, y con este disminuyen el uso de energía de la planta. De esta manera se mejora la eficiencia energética de las plantas, se

reducen costos operativos y se disminuye el impacto ambiental (Nashed & Van Dang, 2022).

4.5.2. Uso de Energías Renovables

Independiente del uso de dispositivos que recuperen energía, reduciendo el consumo de esta, el proceso sigue necesitando de altas cantidades de energía, una forma de disminuir la contaminación e impacto ambiental asociados a este consumo es el uso de energías renovables, tales como energía solar o eólica (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

En comparación con el uso de combustibles fósiles, las energías renovables son más abundantes y sostenibles. Al usar energías renovables se emiten considerablemente menos gases de efecto invernadero, como se puede ver en la figura 4.2, donde se comparan las emisiones de distintos métodos de desalinización usando energías renovables y combustibles fósiles, y se puede ver que la diferencia es significativa.

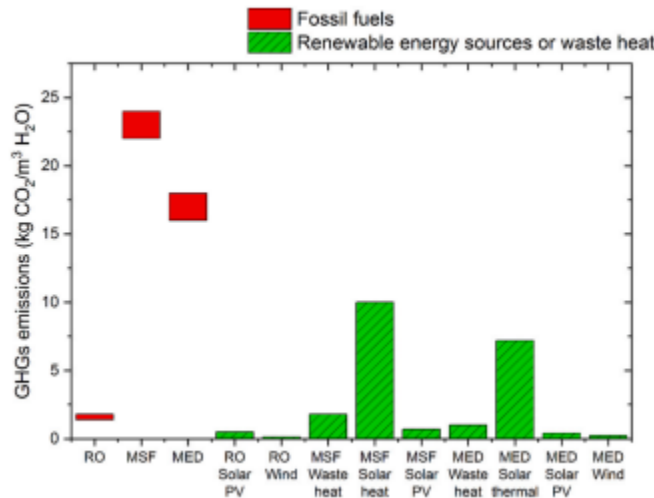


Figura 4.2: Comparación emisiones de gases de efecto invernadero por m³ de agua desalinizada usando combustibles fósiles y energías renovables (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

Sin embargo, a pesar de la considerable diferencia en las emisiones, la cantidad de plantas desalinizadoras basadas en energías renovables es considerablemente baja (menos del 1 %), esto debido a los altos costos energéticos que implica el cambio, además de el hecho de que en ciertas zonas las energías renovables no son una fuente constante debido a factores climáticos (Global Solar Atlas, 2020; Panagopoulos & Haralambous, 2020).

Un mayor uso de energías renovables en el proceso de desalinización sería de gran importancia para la sostenibilidad y disminución de impacto ambiental, actualmente la cantidad usada es baja, sin

embargo, poco a poco esta puede ir aumentando, a medida que se desarrollen nuevas tecnologías que disminuyan los gastos y que se vaya avanzando en la legislación y los procesos de descarbonización de la matriz energética.

4.6. Aspectos que influyen en los impactos ambientales de las plantas desalinizadoras

Si bien los impactos mencionados anteriormente deben ser considerados para todas las plantas de desalinización, existen factores de la planta, tales como su tamaño y su ubicación, que pueden influir en el impacto.

4.6.1. Tamaño de la planta

El tamaño de la planta tiene una relación directa con sus impactos ambientales.

Una planta más grande produce más agua, lo cual también implica un mayor consumo de agua, es decir, una mayor captación, aumentando este impacto ambiental. Además, por cada litro de agua producida se producen aproximadamente 1,5 litros de descarga, por lo que una planta más grande genera mayor cantidad de desechos (Sola et al., 2019).

Por otro lado, procesar una mayor cantidad de agua implica la necesidad de más membranas, y con esto un mayor requerimiento energético, por lo que todo aumenta al aumentar el tamaño de la planta, ya que como se ha podido ver, tanto la energía como las membranas tienen requerimientos por metro cúbico de agua (Elsaid et al., 2020).

Todo esto quiere decir que el impacto ambiental tiene una relación directa con el tamaño de la planta, es decir, cuando el tamaño de la planta aumenta, también lo hace el impacto ambiental.

4.6.2. Ubicación de la planta

La ubicación de la planta puede tener distintas implicaciones en el impacto ambiental de estas. En primer lugar, los impactos de la captación y descarga pueden tener una mayor relevancia si la planta está ubicada en zonas con especies en peligro o especies de una mayor sensibilidad.

Además, dependiendo de su ubicación, el agua podría contener diversos contaminantes, así como una cantidad variable de sólidos y variaciones en la salinidad. Todos estos factores, junto con otros, influyen en los impactos ambientales de la planta. En primer lugar, si el agua contiene

contaminantes, estos pueden concentrarse en el efluente, lo que podría acelerar el deterioro de las membranas y aumentar el impacto ambiental en la zona de descarga. Lo mismo sucede con la cantidad de sólidos, ya que una mayor concentración de estos requiere una presión adicional sobre las membranas durante el proceso de desalinización, lo que aumenta el consumo de energía y puede provocar un mayor desgaste de las membranas. Por último, una mayor salinidad en el área de influencia de la planta resulta en un efluente más salino, lo que agrava su impacto ambiental.

Capítulo 5

Marco Normativo y Regulatorio

5.1. Legislación y Regulaciones pertinentes para el proceso

En Chile, el proceso de desalinización por ósmosis inversa está sujeto a diferentes leyes, normativas y regulaciones, en el ámbito ambiental, sanitario, y otros. Al investigar, las regulaciones consideradas más relevantes son las que se nombrarán a continuación.

5.1.1. Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (19.300)

Esta ley establece principios y normativas fundamentales para la protección ambiental en Chile. En el contexto de las plantas desalinizadoras, la ley podría ser relevante en los siguientes aspectos:

Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)

Esta ley establece el proceso para las Evaluaciones de Impacto Ambiental, en estas los proyectos, incluyendo plantas desalinizadoras, son evaluados para estimar sus potenciales impactos ambientales en el entorno del área de desarrollo de este. Para esto se evalúan posibles efectos en agua, suelo, biodiversidad y otros (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1994).

Mitigación de Impactos

Esta ley exige a los proyectos que implementen medidas de mitigación para reducir o compensar los impactos ambientales identificados durante la evaluación de impacto ambiental (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1994).

Participación ciudadana

Esta ley garantiza la participación ciudadana de las comunidades cercanas durante el proceso de evaluación de impacto ambiental. Esto permite a la comunidad y a las organizaciones ambientales

expresar sus preocupaciones y aportar información que podría ser relevante sobre los posibles impactos del proyecto (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1994).

Responsabilidad Ambiental

La ley establece el principio de responsabilidad ambiental, este implica que los titulares de los proyectos son responsables de los impactos ambientales de los impactos ambientales causados por sus actividades, y por lo tanto, están obligados a tomar medidas de prevención, mitigación y/o reparación de los daños ambientales causados (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1994).

5.1.2. Norma Chilena NCh 409/1: Agua Potable

Esta norma define los requisitos para el agua potable en Chile, en términos de calidad y seguridad para el consumo humano. Proporciona criterios sobre los parámetros de calidad, límites máximos permitidos, métodos de análisis y otros, garantizando la protección de la salud y el suministro de agua potable de calidad en el país. Los principales puntos que aborda se verán a continuación.

Objeto y campo de aplicación

La norma está aplicada al agua potable para consumo humano en Chile, abarcando los ámbitos de seguridad y calidad (Instituto Nacional de Normalización, 2005).

Requisitos generales

La norma establece criterios que debe cumplir el agua potable, tales como no tener olor (inodora), ser transparente (incolora) y no tener sabor. Además, debe ser microbiológicamente segura y no debe contener contaminantes químicos en concentraciones que representen riesgos para la salud humana (Instituto Nacional de Normalización, 2005).

Parámetros de calidad

La norma establece parámetros de calidad del agua potable, y sus límites máximos y mínimos permitidos. Esto incluye los parámetros microbiológicos, parámetros físicos y químicos, tales como coliformes, escherichia coli, turbidez, pH, cloro residual y metales pesados (Instituto Nacional de Normalización, 2005).

Métodos de análisis

La norma especifica los métodos de análisis adecuados para la determinación de los diferentes parámetros de calidad del agua potable, que puedan asegurar la mayor precisión y fiabilidad de los resultados. También establece la frecuencia con la que se deben realizar los análisis y muestreos,

con el fin de asegurar la calidad del agua (Instituto Nacional de Normalización, 2005).

5.1.3. Norma Chilena NCh 1333: Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos

Esta norma establece requisitos del agua para diferentes usos, con un marco normativo para garantizar la calidad y seguridad del agua en sus distintos usos. Estas normas son fundamentales en la protección de la salud humana y ambiental. Los principales puntos que menciona se nombrarán a continuación.

Agua Potable

Si bien el agua potable tiene su propia normativa, esta norma la vuelve a mencionar, estableciendo los requisitos mínimos que debe cumplir el agua para consumo humano (Instituto Nacional de Normalización, 1987).

Agua de Uso Doméstico

El agua para uso en la cocina, lavado y baño, este agua debe cumplir parámetros similares al agua potable en términos de pH, calidad microbiológica y química (Instituto Nacional de Normalización, 1987).

Agua para Consumo Animal

Se establece los requisitos del agua para consumo de animales, tanto para animales de granja como mascotas. La normativa establece los parámetros microbiológicos, químicos y físicos que debe cumplir el agua y que aseguren la seguridad y salud de los animales que la consuman (Instituto Nacional de Normalización, 1987).

Agua para Agricultura

En el caso de riego para la agricultura, la norma establece criterios de calidad del agua que garanticen la seguridad y nutrición de las plantas, evitando la acumulación de sales y elementos tóxicos o perjudiciales para el suelo (Instituto Nacional de Normalización, 1987).

Agua para Industria

Para el agua de uso en procesos industriales, se establecen requisitos que debe cumplir, estos requisitos pueden variar según la industria para la que será utilizada el agua, y las necesidades de esta. Los requisitos pueden incluir parámetros de calidad y de límites máximos y/o mínimos de componentes que puedan influir en los procesos industriales o en el producto final de estos (Instituto Nacional de Normalización, 1987).

Agua para otros usos

La norma también establece requisitos para otros usos del agua, como para uso recreativo, vida acuática, estética, y otros (Instituto Nacional de Normalización, 1987).

5.1.4. Código de Aguas

El código de aguas establece un marco normativo que gestiona el uso y el aprovechamiento de las aguas, lo cual incluiría el uso del agua de mar para la desalinización. Los principales puntos a considerar se exponen a continuación.

Derechos de Agua

Se establece un régimen de derechos de agua, que entrega a los usuarios derechos sobre las aguas superficiales y subterráneas. Las concesiones sobre las aguas son entregadas por la Dirección General de Aguas (DGA) (Ministerio de Obras Públicas, 1981).

Regulación de Extracción

El código de aguas establece una regulación para la extracción de las aguas, con el fin de asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico y prevenir o disminuir los impactos ambientales negativos. Estas regulaciones pueden incluir restricciones sobre la cantidad de agua que se puede extraer y la ubicación para los puntos de captación del agua (Ministerio de Obras Públicas, 1981).

Permisos y Autorizaciones

La DGA debe dar las autorizaciones y permisos que correspondan para el uso de las aguas y la disposición de los desechos de los procesos (Ministerio de Obras Públicas, 1981).

Protección Ambiental

Se entregan disposiciones para la protección del medio ambiente acuático, buscando minimizar los impactos ambientales resultado de distintos procesos (Ministerio de Obras Públicas, 1981).

Fiscalización y Control

El código de aguas establece mecanismos de fiscalización y control para que se cumplan con las distintas disposiciones y condiciones establecidas (Ministerio de Obras Públicas, 1981).

5.1.5. Guía para la descripción de Proyectos de Plantas Desalinizadoras en el SEIA

Esta es una Guía presentada por el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), el cual detalla la descripción de los proyectos de desalinización para ingresar a evaluación, la identificación de los impactos ambientales que pueden surgir, y las leyes aplicables a los proyectos (Servicio de Evaluación Ambiental, 2023).

5.1.6. DL N°2.222 1978: Ley de Navegación

Regula la descarga de efluentes en el mar, regulando así la descarga de sustancias que podrían contaminar el agua, y/o causar daños o perjuicios en el ecosistema marino (Ministerio de Defensa Nacional, 1978).

5.1.7. D.S N°1 1992: Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática

Regula los proyectos y/o acciones susceptibles a producir contaminación en las aguas marinas y puertos sometidos a la jurisdicción nacional. Indica normas y procedimientos para evitar la contaminación en el mar (Ministerio de Defensa Nacional, 1992).

5.1.8. D.S. N°90 2000: Establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales

Regula las descargas de efluentes o residuos industriales líquidos en el mar. Establece los límites máximos permitidos de descarga y monitoreos regulares (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2000).

5.1.9. Ley N°20.293: Protege a los Cetáceos e Introduce Modificaciones a la Ley N° 18.892 General de Pesca y Acuicultura

Se encarga de la protección de los cetáceos, que son fauna silvestre que se puede ver afectada por las emisiones. La ley prohíbe matar, cazar, capturar, poseer, transportar, y otros, que puedan tener un efecto negativo sobre cualquier especie de cetáceo en el espacio marítimo (Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción; Subsecretaría de Pesca, 2008).

5.1.10. DS N°430 1992: Fija el Texto Refundido, Coordinado y Sistematizado de la Ley N°18.892 y sus Modificaciones, Ley General de Pesca y Acuicultura

Regula la fauna marina y la descarga de efluentes en el mar. Establece la abstención de extraer, poseer, transportar, propagar y comercializar recursos hidrobiológicos (fauna marina), además de

la abstención de introducir, directa o indirectamente, en cuerpos de agua, agentes contaminantes químicos, biológicos o físicos, que puedan causar daño a la fauna, sin que hayan sido neutralizados con anterioridad para evitar o disminuir los daños (Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, 1991).

5.2. Análisis

El marco normativo y regulatorio es bastante amplio, optando por un enfoque específico en las leyes del área ambiental y de gestión del agua para el proyecto. Es importante señalar que existen otras legislaciones que podrían tener importancia en el proceso, como las leyes laborales destinadas a los trabajadores de las plantas. Sin embargo, dada la naturaleza y el enfoque de este trabajo, únicamente se consideran las normativas mencionadas anteriormente.

Dentro de las leyes contempladas se abarca el área medioambiental, la calidad del agua para distintos usos, los derechos de agua y la protección del ecosistema marino. Es crucial la protección ambiental, enfatizando en la evaluación de los proyectos para garantizar el menor impacto ambiental posible, regulando con las distintas normativas durante su construcción, operación y cierre.

Se hace especial hincapié en la protección de la fauna marina, especialmente de los cetáceos, posiblemente debido a que varios de estos se encuentran en peligro de extinción (El Mostrador, 2021) (Cabrera & Cárdenas, 2023), pero también se mencionan otras especies de fauna marina y el ecosistema marino en general.

Además, se debe otorgar gran importancia a garantizar agua de calidad para cualquier uso, asegurándose de que el agua sea segura y cumpla con todos los estándares de calidad necesarios establecidos, y que sea monitoreada regularmente para garantizar un correcto funcionamiento.

Siguiendo con lo anterior, se debe dar gran importancia a la regulación y fiscalización para asegurar el cumplimiento de las normativas y leyes, y así garantizar la seguridad de los humanos y de todo el ecosistema, y minimizar los impactos ambientales.

Las plantas desalinizadoras, aunque pueden ser necesarias para hacer frente a la creciente escasez hídrica, deben cumplir todas las normativas ambientales para que su operación no empeore la situación mundial, y los proyectos puedan ser llevados a cabo exitosamente. Las leyes, normativas y regulaciones deben ser cumplidas para que las plantas puedan seguir operando y para que en el proceso de producción de agua no se genere un daño adicional al ecosistema.

Además, es crucial tener presente que la mera producción de agua no es suficiente. Es imperativo que esta agua cumpla con estándares de calidad para no representar un peligro; de lo contrario, podría resultar más perjudicial que la escasez misma. Por tanto, es necesario respetar rigurosamente dichos estándares.

Capítulo 6

Metodología

6.1. Programa WAVE

Para llevar a cabo el análisis cuantitativo de los consumos de las plantas desalinizadoras mediante ósmosis inversa, se empleó el programa WAVE.

El programa WAVE (Water Application Value Engine) es un software de modelado de DuPont que integra tres tecnologías clave: ultrafiltración, ósmosis inversa e intercambio iónico (DuPont, 2021).

Este programa permite a los usuarios diseñar sistemas de tratamiento de agua personalizados y optimizados según las necesidades específicas de cada planta. Utilizando algoritmos y modelos avanzados, WAVE simula y predice el rendimiento de los sistemas, capacitando a ingenieros y operadores para tomar decisiones informadas sobre diseño y operación (DuPont, 2019).

Dentro de los usos del programa, se puede emplear para la simulación de plantas desalinizadoras, que es el uso que se le dió en este trabajo.

El programa lleva a cabo simulaciones de plantas desalinizadoras, permitiendo la variación de condiciones de entrada y/o operación de la planta. De esta manera, se puede analizar cómo estos cambios pueden afectar diversos factores, como la cantidad de productos químicos a añadir, la energía consumida o la cantidad de membranas necesarias, entre otros.

6.2. Descripción de la Modelación

6.2.1. Supuestos

Para realizar la modelación, se buscó incorporar la mayor cantidad posible de datos reales para obtener resultados fieles a la realidad. Sin embargo, debido a diversas razones, se debieron realizar algunos supuestos. A continuación, se detallaron estos supuestos, reconociendo la necesidad de establecer premisas para completar la información necesaria en el proceso de modelado:

1. Caudales de producción y entrada constantes: En la realidad, estos caudales podrían variar según las condiciones ambientales; sin embargo, se supuso para efectos de las modelaciones y su análisis que estos se mantienen de manera constante.
2. Valores de entrada constantes: Es probable que, con el tiempo, valores tales como las temperaturas, pH, entre otros, varíen; sin embargo, para efectos de las modelaciones se supuso que se mantienen constantes.
3. Valores de concentraciones de iones entregados por el programa, supuestos como verdaderos: Para que el programa pueda realizar las modelaciones, requiere que la suma de los distintos iones sea lo más cercana a 0 posible; es por ello que se asumió que estos son los valores proporcionados por la librería del programa para agua de mar, los cuales serán especificados más adelante.
4. El número de membranas puede variar entre 1 y 8 por módulo (DuPont, 2021), se usó un total de 8 membranas por módulo en el caso de la Ósmosis Inversa, excepto en el caso de la planta que produce 1[L/s], debido a su pequeña producción. Esto para reducir el número de módulos, y simplificar los cálculos y comparaciones.
5. El agua de entrada no tiene ningún contaminante o similares, fuera de los iones y los mencionados en la tabla 6.2.
6. Dado que la ley no especifica explícitamente si Chile incorpora magnesio y carbonato de calcio a su agua potable, y la información al respecto es escasa, especificando solo límites máximos, se supuso que se siguen las recomendaciones de la OMS (Zúñiga E. et al., 2022).
7. Para los valores del agua tratada que no se entreguen, se asumieron los que se encuentren en la literatura en para aguas desaladas, cada vez que esto se haga será explícitamente mencionado y referenciado.

6.2.2. Limitaciones por Falta de Datos u Otros

La falta de ciertos datos, poca calidad de estos y/o la necesidad de recurrir a supuestos pueden generar limitaciones en los resultados de las modelaciones.

1. Precisión del Modelo: La precisión del modelo está directamente vinculada a la calidad y cantidad de datos disponibles. Mientras más precisos y representativos sean los datos con respecto a la realidad, más precisión tendrá el modelo. La falta de datos o el uso de supuestos puede comprometer la precisión de las predicciones y resultados, ya que el modelo se ve limitado por la información disponible, afectando su capacidad para reflejar con exactitud las condiciones reales.
2. Falta de Datos: Existen distintas fuentes de datos de agua, sin embargo, muchas no están actualizadas o no cuentan con todos los datos necesarios, y al combinarlos no se encuentra el equilibrio.

6.2.3. Caracterización de parámetros clave

Con el propósito de realizar un análisis exhaustivo de las plantas de desalinización en diversas dimensiones y condiciones, así como facilitar una comparación significativa entre las variaciones en diferentes tamaños y condiciones de plantas, se llevó a cabo un examen detallado de cinco tamaños de planta preseleccionados. El sistema a modelar se puede ver en la figura 6.1. Es importante mencionar que la última fase, “Acondicionamiento para agua potable”, tal como lo indica el nombre, sólo se lleva a cabo para la producción de agua potable, en el caso de la producción de agua para minería y para agricultura se llega hasta el paso anterior, “Post-tratamiento”.

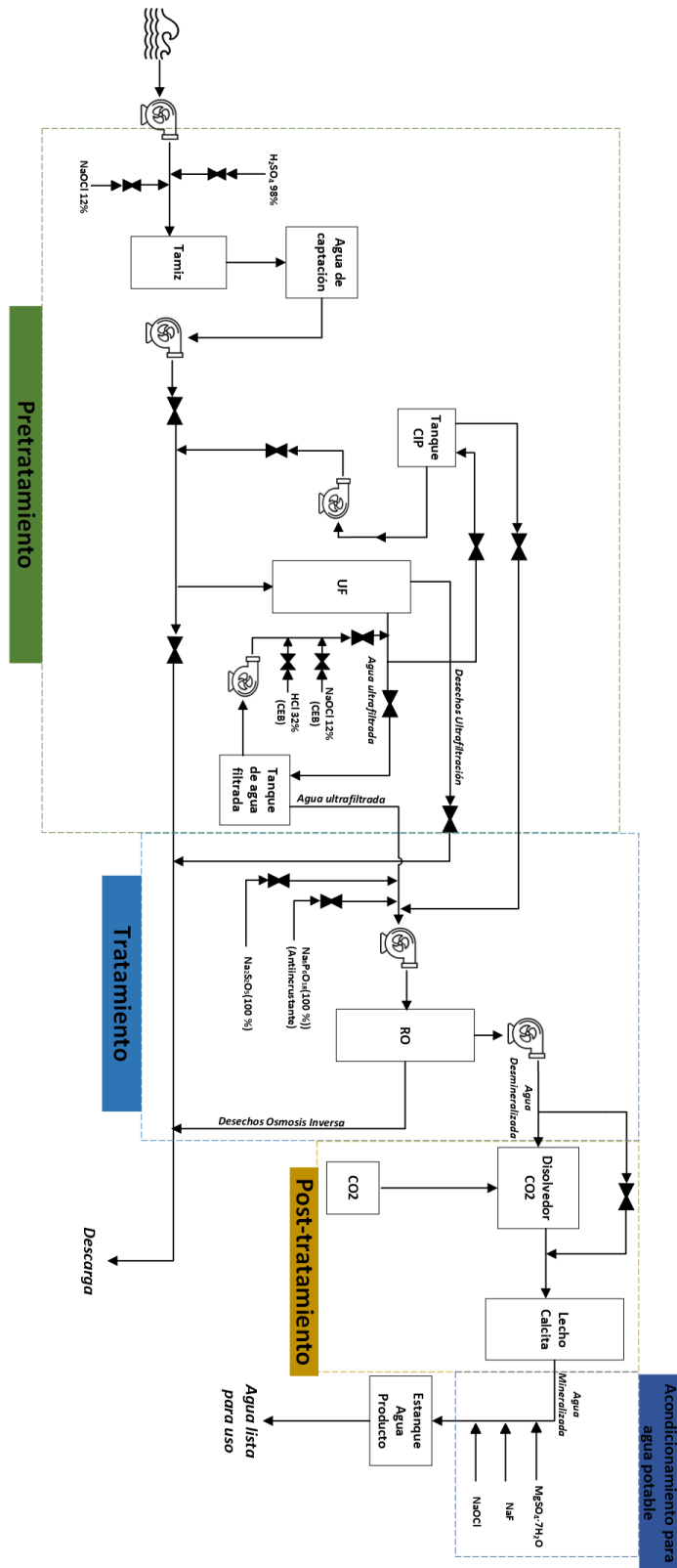


Figura 6.1: Diagrama de sistema de desalinización por ósmosis inversa modelado. Elaboración propia

Los tamaños de planta que se usaron se encuentran especificados en la tabla 6.1, donde la producción de agua sería el agua lista para uso. Los tamaños se clasifican de acuerdo con la producción de agua, proporcionando una visión clara y estructurada de las dimensiones seleccionadas para el estudio. Este enfoque permitió una evaluación completa y detallada de los diversos aspectos y desafíos asociados con cada tamaño de planta, contribuyendo así a una comprensión más profunda de la eficiencia y la sostenibilidad en el contexto de la desalinización.

Tabla 6.1: *Tamaños de plantas desalinizadoras usados en las modelaciones. Elaboración propia.*

Caso	Producción de agua [L/s]
1	1
2	10
3	100
4	1000
5	10000

Adicionalmente, para la caracterización del agua de entrada a las plantas, se empleó agua de mar, utilizando datos específicos de las costas de dos regiones: la región de Atacama y la región de Valparaíso. Esto se llevó a cabo con el fin de comparar si existen diferencias en los resultados al utilizar distintos conjuntos de datos de calidad del agua de entrada.

Se eligieron estas dos regiones de manera aleatoria. La región de Atacama tiene una alta actividad minera y cuenta con cuatro plantas desalinizadoras que producen el 19 % del agua desalinizada del país. Por otro lado, la región de Valparaíso cuenta con tres plantas desalinizadoras de menor capacidad, produciendo solo el 0,7 % del agua desalinizada del país. Sin embargo, se eligió Valparaíso porque, al encontrarse más alejada, presenta mayores cambios en su agua de entrada respecto a una región más cercana (Comisión Chilena del Cobre, 2022b; Comité Científico de Cambio Climático, 2022).

Los datos de calidad del agua, que comprenden valores de turbidez, sólidos suspendidos totales, índice de densidad de sedimentos, Carbono Orgánico Total, temperatura y pH, se encuentran detallados en la tablas 6.2.

Tabla 6.2: Valores de agua de mar en la región de Atacama y de Valparaíso (Ministerio de Medio Ambiente, 2017; SGA S.A. Soluciones en Gestión Ambiental, 2017, 2019)

Variable	Valor Atacama	Valor Valparaíso	Unidades
<i>Turbidez</i>	0,96	1,00	NTU
<i>Sólidos Suspendidos Totales</i>	9,88	46,50	mg/L
<i>Índice de Densidad de Sedimentos</i>	4,88	3,00	-
<i>Carbono Orgánico Total</i>	4,00	3,00	mg/L
<i>Temperatura mínima</i>	12,7	5	°C
<i>Temperatura media</i>	13,5	6	°C
<i>Temperatura máxima</i>	14,2	7	°C
<i>pH</i>	7,53	7,74	-

Los iones, como fue mencionado en los supuestos, son los dados por el programa. Los datos que entrega la librería de agua de mar para los iones se puede observar en la tabla 6.3.

Tabla 6.3: Valores concentración iones agua de mar. Elaboración propia a partir de librería de agua de mar programa WAVE.

Cationes	Concentración[mg/L]	Aniones	Concentración[mg/L]	Neutrales	Concentración[mg/L]
<i>NH₄</i>	0,000	<i>CO₃</i>	4,748	<i>SiO₂</i>	0,000
<i>K</i>	387,011	<i>HCO₃</i>	147,905	<i>B</i>	4,596
<i>Na</i>	10746,447	<i>NO₃</i>	0,000	<i>CO₂</i>	2,083
<i>Mg</i>	1298,036	<i>Cl</i>	19294,974		
<i>Ca</i>	403,011	<i>F</i>	1,400		
<i>Sr</i>	0,000	<i>SO₄</i>	2709,925		
<i>Ba</i>	0,000	<i>PO₄</i>	0,000		
		<i>Br</i>	74,000		

6.2.4. Definición Parámetros de Ultrafiltración

La membrana seleccionada fue la IntegraPac IPD-51, debido a que sus características son compatibles con el tratamiento de agua de mar. Además es utilizada comúnmente como pre-tratamiento en sistemas de ósmosis inversa. Esta membrana tiene un costo inferior en comparación con otras membranas de ultrafiltración y posee capacidad para rechazar contaminantes, incluyendo bacterias y virus (Delta Filtration, 2022). En la tabla 6.4 se pueden ver las características de la membrana.

Tabla 6.4: *Características Membrana IntegraPac IPD-51. Elaboración propia a partir de (Delta Filtration, 2022)*

Características Membrana IntegraPac IPD-51		
<i>Especificación</i>	<i>Unidades</i>	
<i>Material</i>	-	Fluoruro de polivinilideno
<i>Tamaño de poro</i>	μm	0,03
<i>Diámetro interno fibra</i>	mm	0,7
<i>Diámetro externo fibra</i>	mm	1,3
<i>Área membrana</i>	m^2	77
<i>Rango pH</i>	-	2 - 11
<i>Flux de Diseño</i>	LMH	50-120

La elección específica de los módulos y membranas para cada caso dependerá de las características de la membrana dados por el fabricante y el flujo de agua de cada planta.

6.2.5. Definición Parámetros para Químicos de Limpieza y Pre-tratamiento

Durante el proceso se utilizaron distintos químicos en la limpieza y el pre-tratamiento de las aguas, la mayoría de estos son asignados por la modelación, que los asigna de acuerdo con los datos de entrada y los requerimientos finales, sin embargo, algunos debieron ser asignados previamente como será especificado más adelante.

Pre-tratamiento

En el pre-tratamiento, el programa entregó los químicos, que son especificados en la sección de resultados, en la tabla 7.7, excepto en el caso del oxidante, el anti-incrustante y el desclorador, los cuales el programa pide para generar la modelación, por ello se utilizaron las dosificaciones especificadas en la tabla 6.5, siguiendo las recomendaciones del fabricante de acuerdo con el software (DuPont) y los libros "Desalination Engineering" (Voutchkov, 2013) y "Membrane and Desalination Technologies" (Wang et al., 2011).

Tabla 6.5: *Dosificaciones Químicos. Elaboración propia a partir de (Wang et al., 2011).*

Químico	Uso	Dosis [mg/L]
$\text{NaOCl}(12\%)$	Oxidante	5
$\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}(100\%)$	Anti-incrustante	2
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5(100\%)$	Desclorador	3

Cada químico tiene su tiempo y regularidad de dosificación individual, estos se pueden ver a continuación:

1. **Ácido Sulfúrico:** El ácido sulfúrico se aplica una vez por semana, por un periodo de entre 4 y 6 horas (Voutchkov, 2013).

2. **Hipoclorito de Sodio:** El hipoclorito de sodio se aplica cada 48 horas, por un periodo de entre 4 y 6 horas (Voutchkov, 2013).
3. **Metabisulfito de Sodio:** El metabisulfito de sodio se aplica de manera diaria, durante 6 horas (Guajardo Arriagada, 2023).
4. **Hexametafosfato de Sodio:** El hexametafosfato de sodio se utiliza de manera continua, cada día durante las 24 horas del día (Guajardo Arriagada, 2023).

Es a partir de estos resultados que se calcularon las dosis mensuales o anuales de químico necesarias.

Limpieza de Membranas

La limpieza de membranas es esencial para garantizar un funcionamiento eficiente y sostenible de los sistemas de desalinización, mejorando la calidad del agua producida y reduciendo los costos operativos (Matin et al., 2019).

Como se explicó previamente, en la limpieza de las membranas, tenemos el CIP y el CEB, los cuales tienen distintos tiempos de aplicación.

- **CIP:** En el caso del CIP, este tiene una frecuencia de entre cada 5 y 6 meses, y una duración de entre 30 y 60 minutos (Voutchkov, 2013).
- **CEB:** En el caso del CEB, este se realiza de manera diaria, con una duración de entre 20 y 30 minutos (Voutchkov, 2013).

6.2.6. Definición Parámetros de Ósmosis Inversa

La membrana seleccionada para la ósmosis inversa fue la SW30XLE-440, debido a su buen rendimiento y beneficios operativos. Esta membrana no tiene fecha de vencimiento mientras se mantiene almacenada en condiciones adecuadas, lo que simplifica la gestión de su almacenamiento. Además, ofrece requerimientos de mantenimiento y costos reducidos, y cuenta con un peso menor, facilitando su manejo. Son ampliamente utilizadas en la desalinización de agua de mar y en procesos de desalinización industrial, además de tener un alto rechazo al boro (DuPont, 2020). El rechazo al boro resulta importante, considerando que en altas concentraciones puede ser tóxico para los seres vivos (Mancilla-Villa et al., 2014).

Las plantas de ósmosis inversa suelen tener una recuperación del 45 % y siempre constan de solamente 1 etapa, la cual a su vez tiene solamente 1 paso, lo cual será considerado para la entrada al programa (Voutchkov, 2013).

En la tabla 6.6 se pueden ver las características de la membrana.

Tabla 6.6: *Características Membrana SW30XLE-440. Elaboración propia a partir de (DuPont, 2020)*

Características Membrana SW30XLE-440		
<i>Especificación</i>	<i>Unidades</i>	
<i>Material</i>	[-]	Poliamida
<i>Rango pH en operación continua</i>	[-]	2 - 11
<i>Rango pH en corto plazo (30 [min])</i>	[-]	1 - 13
<i>Área membrana</i>	m^2	41
<i>Rechazo a boro</i>	%	91,5
<i>Rechazo sal</i>	%	99,8

Además, el flux de estas no debe superar los 30,2[LMH] (Wang et al., 2011). En función a esto se ajustaron las cantidades de tubos y membranas de los distintos tamaños de plantas.

6.3. Definición Parámetros Acondicionamiento

Para el proceso de acondicionamiento se realizó una remineralización, para esto, en primer lugar se utilizó un lecho de piedra caliza o calcita, que reacciona como se muestra en la ecuación 6.1 (Voutchkov, 2013). Esto remineralizó el agua, agregando los minerales necesarios y ajustando su pH.

La ecuación para la remineralización en el lecho de calcita es la siguiente:



Con esta reacción, por cada 1[mg/L] de dureza aumentada (1 [mol/L]), se necesitan 1[mg/L] de $CaCO_3$ y 0,44[mg/L] de CO_2 (Voutchkov, 2013).

Además, la remineralización se realiza de manera constante, las 24 horas al día (Voutchkov, 2013).

Para el proceso se usarán lechos de depósitos verticales, el modelo PRFV de "Drintec", cuyos detalles se pueden ver en la tabla 6.7.

Tabla 6.7: *Valores lecho de remineralización. Elaboración propia a partir de (Drintec, 2023).*

Parámetro	Unidades	Valor
<i>Díámetro Lecho</i>	[mm]	600 - 2500
<i>Tiempo de contacto</i>	[min]	10-30
<i>Velocidad de ascenso</i>	[m/h]	8 - 15

Con estos valores, junto con la ecuación 6.1, se determinaron las cantidades necesarias de carbonato de calcio y dióxido de carbono, así como las dimensiones requeridas de los lechos.

6.3.1. Remineralización Agua para Consumo Humano

Para que el agua desalinizada sea apta para el consumo humano, debe someterse a una serie de pasos de acondicionamiento que se detallarán a continuación. Esto se debe a que, aunque el agua resultante del proceso de desalinización sale en un estado limpio y libre de contaminantes, aún no cumple con los estándares necesarios para el consumo directo.

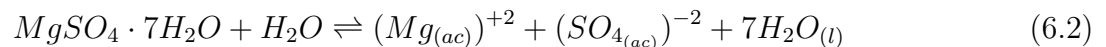
La Norma Chilena NCh 409/1 (Instituto Nacional de Normalización, 2005) establece los parámetros que debe cumplir el agua potable, los cuales se pueden ver en la tabla 6.8.

Tabla 6.8: *Parámetros agua potable en Chile. Elaboración propia a partir de (Instituto Nacional de Normalización, 2005).*

Parámetro	Unidades	Valor
<i>pH</i>	-	6,5 - 8,5
<i>Turbidez</i>	NTU	0 - 2
<i>Sólidos Disueltos Totales</i>	mg/L	0 - 1500
<i>Olor</i>	-	inodora
<i>Sabor</i>	-	insípida

Además, aunque no está establecido en la ley, el agua desalinizada está desmineralizada, y consumir agua en este estado no es bueno para la salud humana, ya que puede causar un desequilibrio de los electrolitos y deshidratación, faltan minerales esenciales para el cuerpo, y además suele ser ácida, pudiendo afectar negativamente en la salud ósea y cardiovascular (Rosborg et al., 2019). La Organización Mundial de la Salud establece que el agua potable debe tener una dureza, o concentración de $CaCO_3$, de hasta 130[mg/L] y una concentración de Mg de hasta 10[mg/L] (Zúñiga E. et al., 2022).

El $CaCO_3$ se añadió en las proporciones establecidas en la ecuación 6.1, mientras el magnesio se añadió en forma de sulfato de magnesio, cuya reacción es la siguiente:



Con esta reacción, por cada 1[mg/L] de Magnesio aumentado, se necesitan 5,93[mg/L] de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (Voutchkov, 2013).

Definición Parámetros de Desinfección

Esta parte es únicamente necesaria para el agua de consumo humano en el caso de la normativa chilena, que no establece la obligatoriedad de desinfección ni para el agua de agricultura ni para el agua de minería.

Para la desinfección al agua se le debe añadir cloro. La concentración de cloro que debe añadirse al agua es de entre 0,2 y 2[mg/L] (Instituto Nacional de Normalización, 2005).

Definición Parámetros de Fluoración

El agua potable en Chile debe contener flúor. Su concentración de flúor debe ser de entre 0,6 y 1[mg/L] (Subsecretaría de Redes Asistenciales, División de Control y Prevención de Enfermedades, Departamento de Salud Bucal, 2022).

6.3.2. Remineralización Agua para Minería

Para que el agua desalinizada sea apta para su uso en minería, debe someterse a un acondicionamiento que se detallará a continuación, esto para evitar daños en los equipos y procesos para los que será utilizada. El agua para minería no debería tener una gran concentración de minerales, ya que estos pueden generar daños en los distintos equipos y procesos. Por lo tanto, el agua desalinizada, que tiene una baja concentración de minerales, resulta adecuada para este uso (Philippe et al., 2010).

Sin embargo, un agua tan ácida como la que sale del proceso de ósmosis inversa no es adecuada para el uso en minería, ya que puede resultar corrosiva y provocar daños en los equipos y procesos. Las condiciones necesarias del agua pueden variar según para qué proceso vayan a ser utilizadas, pero el proceso general entrega un agua con un pH de entre 6 y 8, el cual debe ser ajustado con carbonato de calcio, a una dureza de entre 60 y 100[mg/L] (Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC), 2010; Pardo Lillo, 2021).

6.3.3. Remineralización Agua para Riego

Para que el agua desalinizada sea apta para su uso en agricultura, debe someterse a una serie de pasos de acondicionamiento que se detallarán a continuación. Esto se debe a que, aunque el agua resultante del proceso de desalinización sale en un estado limpio y libre de contaminantes, aún no cumple con los estándares necesarios para su uso en riego.

La Norma Chilena NCh 1333 (Instituto Nacional de Normalización, 1987) establece los requisitos que deben cumplir distintas aguas, según el uso que se les va a dar. Entre estas aguas se encuentra el agua de riego, que es la que se utilizaría para la agricultura, cuyos parámetros se pueden ver en la tabla 6.9.

Tabla 6.9: *Parámetros agua de riego en Chile. Elaboración propia a partir de (Instituto Nacional de Normalización, 1987).*

Parámetro	Unidades	Valor
<i>pH</i>	-	5,5 - 9,0
<i>Sólidos Disueltos Totales</i>	mg/L	0 - 500

El agua del proceso cumple con el límite de sólidos disueltos totales, pero puede generar un agua con un pH menor al indicado. Además, el agua de riego debe tener una dureza de entre 100 y 150[mg/L]. Este nivel moderado permite que no se dañen las tuberías, pero a su vez, evita los taponamientos por precipitación (Swistock, 2021).

6.4. Ecuaciones Utilizadas

Cantidad de Químicos

Los químicos son entregados en concentración, que se encuentra en [mg/L], sin embargo, la cantidad de químico utilizada va a variar según el caudal de agua y el tiempo de aplicación de estos químicos. Para esto se puede usar la ecuación (6.3).

$$Q_{quimico} = \frac{C_{quimico} \cdot Q_{agua} \cdot P_{quimico}}{\rho_{quimico}} \quad (6.3)$$

Donde:

- $Q_{quimico}$: Caudal del químico [$\frac{L}{s}$].
- $C_{quimico}$: Concentración del químico [$\frac{mg}{L}$].

- Q_{agua} : Caudal de agua de entrada $[\frac{L}{s}]$.
- $P_{quimico}$: Dilución del químico[-].
- $\rho_{quimico}$: Densidad del químico $[\frac{mg}{L}]$.

Las densidades de los químicos utilizados son las que podemos ver en la tabla 6.10.

Tabla 6.10: *Densidades de los químicos utilizados en el proceso. Elaboración propia.*

Químico	Densidad[mg/L]
$H_2SO_4(98\%)$	1830000
NaOCl (12 %)	1110000
$Na_2S_2O_5(100\%)$	1480000
$Na_6P_6O_{18}(100\%)$	1100000
Ácido cítrico(100 %)	1660000
HCl(32 %)	1185000
NaOCl(12 %)	1110000
NaOH(50 %)	2130000

Es importante recordar que al usar cualquiera de las ecuaciones, las unidades de las variables pueden variar, pero deben ser consistentes entre sí para lograr un resultado congruente. En ocasiones puede ser necesario hacer conversión de unidades, ya que usaremos el caudal de químico en [L/h], para poder después calcular la cantidad de acuerdo con las horas que se usan estos químicos por día.

Para eso tenemos la ecuación (6.4), considerando que no todos los químicos son añadidos de manera constante, se calculó la cantidad de químico por mes o por año:

$$Cant_{quimico_{mensual/anual}} = Q_{quimico} \cdot T_{operacion_{mensual/anual}} \quad (6.4)$$

Donde:

- $Cant_{quimico_{mensual/anual}}$: Cantidad de químico utilizado en un mes o un año $[\frac{L}{mes}]$; $[\frac{L}{año}]$.
- $Q_{quimico}$: Caudal del químico $[\frac{L}{s}]$.
- $T_{operacion_{mensual/anual}}$: Tiempo que es utilizado el químico en un mes o un año [s].

Remineralización

Para la remineralización se calcularon las dimensiones de lechos necesarias para el proceso. Esto se calculó mediante las siguientes ecuaciones.

En primer lugar, se calculó la superficie que entra en contacto con el agua, causando la remineralización, esta es la superficie filtrante, la cual se calculó en la ecuación 6.5 (Voutchkov, 2013).

$$\text{Superficie filtrante} = \frac{\text{Flujo}}{\text{Velocidad}} \quad (6.5)$$

Donde:

- Flujo: Es el flujo de agua que entra al equipo y pasa por el lecho, las unidades de este son $[\frac{m^3}{h}]$.
- Velocidad: Es la velocidad de ascenso del lecho, este dato es dado por el fabricante y sus unidades son $[\frac{m}{h}]$

Luego, el número de lechos puede ser calculado con la ecuación 6.6 (Voutchkov, 2013):

$$N^{\circ}lechos = \frac{\text{Superficie filtrante}}{\text{Área}} \quad (6.6)$$

Donde:

- Superficie filtrante: Es la superficie que entra en contacto con el agua, sus unidades son $[m^2]$.
- Área: Es el área del lecho, y se puede calcular a partir del diámetro dado por el fabricante, sus unidades son $[m^2]$.

Además, se calculó la altura del lecho, la cual se puede calcular con la ecuación 6.7 (Voutchkov, 2013):

$$\text{Altura lecho} = (\text{Velocidad de ascenso}) \cdot (\text{Tiempo de Contacto}) \quad (6.7)$$

Donde:

- Velocidad: Es la velocidad a la que el agua se mueve por el lecho, este dato es dado por el fabricante, y sus unidades son $[\frac{m}{h}]$.
- Tiempo de contacto: Es la cantidad de tiempo que el agua está en contacto con el lecho, y es dado por el fabricante, sus unidades son $[\text{min}]$.

Capítulo 7

Resultados

7.1. Resultados de la Modelación

A partir de la modelación, se obtuvieron distintos resultados para los diversos tamaños de plantas desalinizadoras y para las distintas condiciones de entrada. Estos se pueden observar a continuación.

El agua de las modelaciones en la región de Atacama sale de la ósmosis inversa (“Agua desalinizada” en el diagrama de la figura 6.1) con un pH de 5,2, lo que indica acidez, y una turbidez de 0,1 NTU. Mientras que el agua en la región de Valparaíso sale con un pH de 5,1, el cual también indica acidez, y una turbidez de 0,1 NTU. En las tablas 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5 se pueden apreciar los parámetros más importantes de cada sistema, tanto a la entrada como a la salida de los mismos.

Producción de agua: 1[L/s]

Tabla 7.1: *Resumen de Parámetros de Entrada y Salida para plantas con producción de 1[L/s]. Elaboración propia a partir de datos de modelación.*

		Atacama			Valparaíso		
		Tamiz	Ultrafiltración	Ósmosis inversa	Tamiz	Ultrafiltración	Ósmosis inversa
Alimentación	Caudal[L/s]	2,4	2,4	2,2	2,7	2,7	2,2
	Sólidos Disueltos Totales [mg/L]	35099,3	35099,3	35086,0	35110,4	35110,4	35095,0
Producto	Caudal[L/s]	2,4	2,2	1,0	2,7	2,2	1
	Recuperación	99,50 %	92,33 %	45 %	99,50 %	84,29 %	45 %
	Energía específica[KWh/m ³]		0,07	4,14		0,09	4,32
	Sólidos Disueltos Totales [mg/L]	35099,3	35086,0	71,0	35110,4	35095,0	45,2
Sistema	Energía específica[KWh/m ³]	4,29			4,52		
	Caudal de alimentación[L/s]	2,4			2,7		
	Caudal de producto [L/s]	1			1		
	Recuperación	41,3 %			37,7 %		

Producción de agua: 10[L/s]

Tabla 7.2: Resumen de Parámetros de Entrada y Salida para plantas con producción de 10[L/s]. Elaboración propia a partir de datos de modelación.

		Atacama			Valparaíso		
		Tamiz	Ultrafiltración	Ósmosis inversa	Tamiz	Ultrafiltración	Ósmosis inversa
Alimentación	Caudal[L/s]	23,8	23,7	22,2	26,5	26,4	22,2
	Sólidos Disueltos Totales [mg/L]	35106,9	35106,9	35094,0	35110,4	35110,4	35095,0
Producto	Caudal[L/s]	23,7	22,2	10,0	26,4	22,2	10,0
	Recuperación	99,50 %	93,69 %	45 %	99,50 %	84,29 %	45 %
	Energía específica[KWh/m ³]		0,06	4,64		0,08	4,91
	Sólidos Disueltos Totales [mg/L]	35106,9	35094,0	55,2	35110,4	35095,0	35,1
Sistema	Energía específica[KWh/m ³]	4,77			5,09		
	Caudal de alimentación[L/s]	23,8			26,5		
	Caudal de producto [L/s]	10,0			10,0		
	Recuperación	42,0 %			37,7 %		

Producción de agua: 100[L/s]

Tabla 7.3: Resumen de Parámetros de Entrada y Salida para plantas con producción de 100[L/s]. Elaboración propia a partir de datos de modelación.

		Atacama			Valparaíso		
		Tamiz	Ultrafiltración	Ósmosis inversa	Tamiz	Ultrafiltración	Ósmosis inversa
Alimentación	Caudal[L/s]	238,6	237,4	222,2	262,7	261,4	222,2
	Sólidos Disueltos Totales [mg/L]	35106,9	35106,9	35094,0	35110,4	35110,4	35095,0
Producto	Caudal[L/s]	237,4	222,2	100,0	261,4	222,2	100,0
	Recuperación	99,50 %	93,61 %	45 %	99,50 %	85,03 %	45,0 %
	Energía específica[KWh/m ³]		0,06	4,64		0,08	4,91
	Sólidos Disueltos Totales [mg/L]	35106,9	35094,0	55,2	35110,4	35095,0	35,1
Sistema	Energía específica[KWh/m ³]	4,77			5,09		
	Caudal de alimentación[L/s]	238,6			262,7		
	Caudal de producto [L/s]	100,0			100,0		
	Recuperación	41,9 %			38,1 %		

Producción de agua: 1000[L/s]

Tabla 7.4: Resumen de Parámetros de Entrada y Salida para plantas con producción de 1000[L/s]. Elaboración propia a partir de datos de modelación.

		Atacama			Valparaíso		
		Tamiz	Ultrafiltración	Ósmosis inversa	Tamiz	Ultrafiltración	Ósmosis inversa
Alimentación	Caudal[L/s]	2346,4	2334,7	2222,0	2645,3	2632,1	2222,0
	Sólidos Disueltos Totales [mg/L]	35106,9	35106,9	35094,0	35110,4	35110,4	35095,0
Producto	Caudal[L/s]	2334,7	2222,0	1000,0	2632,1	2222,0	1000,0
	Recuperación	99,50 %	95,19 %	45 %	99,50 %	84,43 %	45 %
	Energía específica[KWh/m ³]		0,07	4,64		0,08	4,91
	Sólidos Disueltos Totales [mg/L]	35106,9	35094,0	55,2	35110,4	35095,0	35,1
Sistema	Energía específica[KWh/m ³]	4,80			5,09		
	Caudal de alimentación[L/s]	2346,4			2645,3		
	Caudal de producto [L/s]	1000,0			1000,0		
	Recuperación	42,6 %			37,8 %		

Producción de agua: 10000[L/s]

Tabla 7.5: Resumen de Parámetros de Entrada y Salida para plantas con producción de 10000[L/s]. Elaboración propia a partir de datos de modelación.

		Atacama			Valparaíso		
		Tamiz	Ultrafiltración	Ósmosis inversa	Tamiz	Ultrafiltración	Ósmosis inversa
Alimentación	Caudal[L/s]	23886,9	23767,5	22223,0	25767,4	25638,5	22222,0
	Sólidos Disueltos Totales [mg/L]	35106,9	35106,9	35094,0	35110,4	35110,4	35095,0
Producto	Caudal[L/s]	23767,5	22223,0	10000,0	25638,5	22222,0	10000,0
	Recuperación	99,50 %	93,5 %	45 %	99,50 %	86,68 %	45 %
	Energía específica[KWh/m ³]		0,06	4,64		0,08	4,91
	Sólidos Disueltos Totales [mg/L]	35106,9	35094,0	55,2	35110,4	35095,0	35,1
Sistema	Energía específica[KWh/m ³]	4,77			5,09		
	Caudal de alimentación[L/s]	23886,9			25767,4		
	Caudal de producto [L/s]	10000,0			10000,0		
	Recuperación	41,9 %			38,8 %		

Membranas Usadas

El programa también entrega la cantidad de membranas usadas para cada proceso, como se puede ver en la tabla 7.6

Tabla 7.6: Membranas utilizadas durante el proceso. Elaboración propia a partir de datos de modelación

Agua producida [L/s]	Atacama		Valparaíso	
	Membranas UF	Membranas OI	Membranas UF	Membranas OI
1	4	4	4	4
10	32	32	40	32
100	324	320	378	320
1000	3240	3200	3960	3200
10000	33000	32000	33000	32000

Demanda de Químicos

Además, la modelación entrega la dosis de químicos necesarios para las distintas fases del proceso, excepto los ya mencionados en la tabla 6.5, estas se pueden ver en la tabla 7.7.

Tabla 7.7: Demanda de Químicos para plantas desalinizadoras. Elaboración propia a partir de datos de modelación.

Químico	Función	Atacama Dosis[mg/L]	Valparaíso Dosis[mg/L]
Ácido Cítrico (100 %)	CIP	2000	2000
HCl(32 %)	CEB1	512	495
	CIP	512	495
H2SO4(98 %)	Pretratamiento	10	14
NaOCl(12 %)	Pretratamiento	5	5
	CEB2	350	350
	CIP	2000	2000
NaOH(50 %)	CIP	407	271

7.2. Cálculos a partir de Resultados de la Modelación

7.2.1. Valores de Energía en Ultrafiltración

A partir de los resultados de la modelación, se obtienen los valores de energía específica de la ultrafiltración, y al multiplicar estos por el volumen, se obtiene el valor de energía. Los valores en detalle se encuentran en la tabla 10.1 del anexo.

Para realizar una mejor comparación de los datos de cada modelación, se generó el gráfico de la figura 7.1.

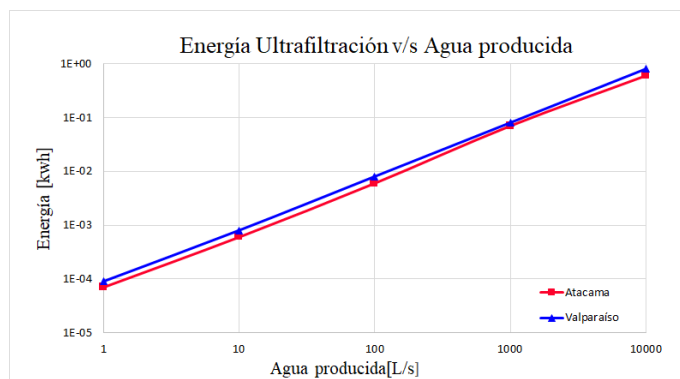


Figura 7.1: Gráfico producción de agua v/s energía ultrafiltración. Elaboración propia.

Se puede observar, que los valores obtenidos para la simulación de la región de Valparaíso son más altos que los de la región de Atacama, lo cual es comprensible dado la considerablemente mayor cantidad de sólidos suspendidos en el agua de esta región, en comparación con los de la región de Atacama, además, en los datos de entrada se puede observar que el agua en Atacama presenta una mayor temperatura, esto reduce la viscosidad del agua de mar, lo cual aumenta la permeabilidad de la membrana, permitiendo el paso de las sustancias con una mayor facilidad, lo que requiere menos presión, y por lo tanto, menos energía (Voutchkov, 2013).

Además, se puede notar que los comportamientos de ambas modelaciones son consistentes entre sí, exhibiendo valores notablemente estables en la energía específica y un crecimiento directamente proporcional entre la energía y la producción de agua.

7.2.2. Valores de Energía en Ósmosis Inversa

A partir de los resultados de la modelación, se obtienen los valores de energía específica de la ósmosis inversa, y al multiplicar estos por el volumen, se obtiene el valor de energía. Los valores

en detalle se encuentran en la tabla 10.2 del anexo.

Para realizar una mejor comparación de los datos de cada modelación, se generó el gráfico de la figura 7.2.

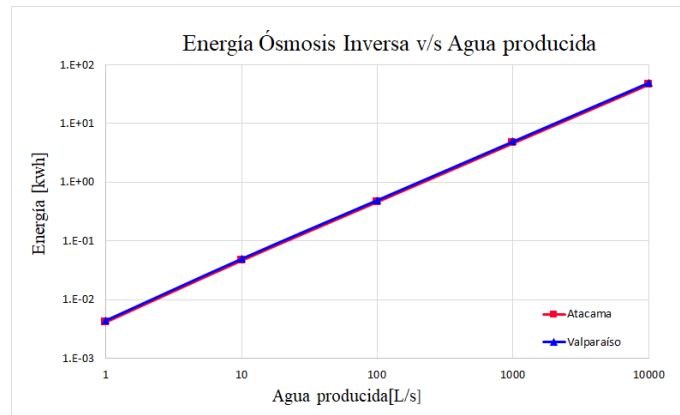


Figura 7.2: *Gráfico producción de agua v/s energía Ósmosis inversa. Elaboración propia.*

Se puede observar, tanto en la tabla 10.2, como en el gráfico de la figura 7.2, que los valores obtenidos para la simulación de la región de Valparaíso son nuevamente, al igual que en la ultra-filtración, más altos que los de la región de Atacama. Esto podría deberse al mismo motivo, ya que al tener más sólidos las membranas necesitan un mayor esfuerzo, requiriendo más energía. Sin embargo, debido al pretratamiento de la ulfiltración, es poco probable que este sea el causante de la diferencia, ya que los sólidos son en su mayoría eliminados del agua en el proceso.

Existen diversos factores que podrían estar afectando el proceso, tales como la salinidad o presión, sin embargo, si nos enfocamos en los datos de entrada de ambas aguas, podemos observar que el agua de la región de Atacama tiene una mayor temperatura, esto reduce la viscosidad del agua salina, aumentando la permeabilidad de la membrana. Se tiene como regla general que por cada 1°C de temperatura que aumenta, el flujo aumenta un 3 %, por lo que, considerando la diferencia de $7,5^{\circ}\text{C}$ entre ambas aguas, la diferencia de producción alcanzaría el 22,5 % (Voutchkov, 2013).

Además, se puede notar que los comportamientos de ambas modelaciones son consistentes entre sí, teniendo el mismo comportamiento para ambos casos, y exhibiendo valores notablemente estables en la energía específica y un crecimiento proporcionalmente directo entre la energía y la producción de agua.

7.2.3. Cambio de Membranas

Se tienen las membranas necesarias por cada planta para que esta funcione. La planta tienen una vida de aproximadamente 30 años, mientras las membranas de ultrafiltración tienen una vida útil de aproximadamente 5 años, mientras las de ósmosis inversa tienen una vida de entre 5 y 10 años, estos tiempos pueden variar según las condiciones del agua tratada, pero son los valores típicos (Senán-Salinas et al., 2019; Yu et al., 2021).

Consideraremos dos casos, un primer caso ideal, y otro donde las membranas no han sido cuidadas adecuadamente.

1. **Primer caso:** La membrana de ósmosis inversa tendrá una vida de 7 años, y la de ultrafiltración tendrá una vida de 5 años. Para 30 años de vida de la planta, habría que cambiar las membranas de ósmosis inversa 5 veces, y las de ultrafiltración 6 veces.
2. **Segundo caso:** La membrana de ósmosis inversa tendrá una vida de 2 años, y la de ultrafiltración tendrá una vida de 1 años. Para 30 años de vida de la planta, habría que cambiar las membranas de ósmosis inversa 15 veces, y las de ultrafiltración 30 veces.

La comparación entre ambos casos, tanto para Atacama como para Valparaíso, se pueden ver en los gráficos de las figuras 7.3 y 7.4. El detalle de las cantidades de membranas usadas y posteriormente desechadas se puede ver en la tabla 10.3, presente en el anexo.

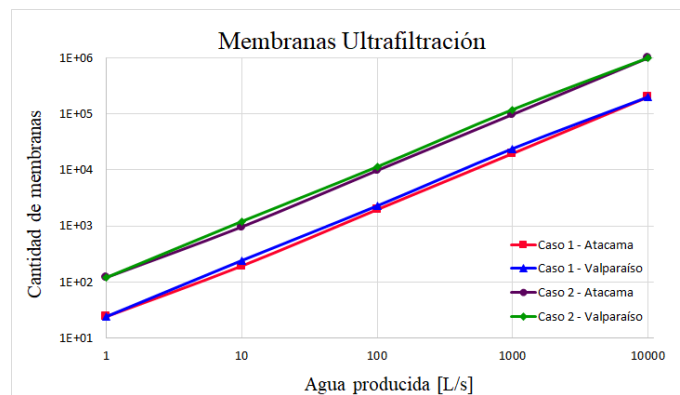


Figura 7.3: Gráfico Membranas de Ultrafiltración v/s Agua producida. Elaboración propia.

Se puede observar, el mismo comportamiento para ambos casos en términos de tendencia, mientras que, evidentemente al tener membranas con una menor vida, se hace necesaria una mayor cantidad de estas, generando una mayor cantidad de desechos.

Además, podemos ver que en el caso de la ultrafiltración, tanto en el caso 1 como en el caso 2,

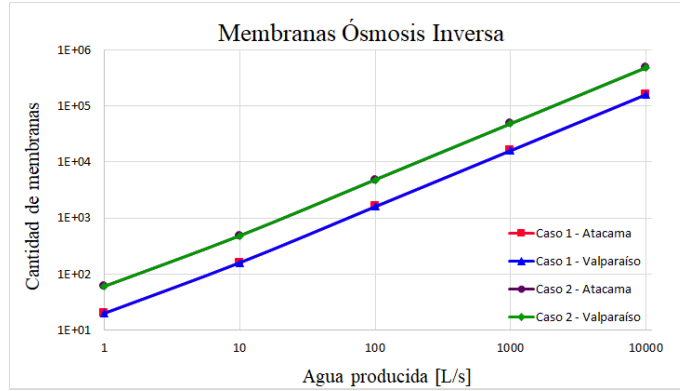


Figura 7.4: Gráfico Membranas de Ósmosis Inversa v/s Agua producida. Elaboración propia.

valparaíso usa una mayor cantidad de membranas, aunque la diferencia no es grande, mientras en el caso de la ósmosis inversa los valores son iguales para valparaíso y atacama, esta diferencia puede deberse, primero a la cantidad de sólidos y solutos presentes en el agua, y además, a la temperatura, ya que al aumentar la producción del agua con la temperatura se hacen necesarias una menor cantidad de membranas (Voutchkov, 2013), pero considerando que la cantidad de membranas se iguala en la presión, la diferencia es atribuible principalmente a los sólidos presentes en el agua.

7.2.4. Cantidades de Químicos en el Pretratamiento

A partir de las concentraciones obtenidas en la modelación, y utilizando las ecuaciones (6.3) y (6.4), se pueden calcular las dosificaciones de los químicos.

Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)

Se tiene la concentración de H_2SO_4 para las dos ubicaciones, que ya se obtuvieron previamente y están en la tabla 7.7, teniendo estas concentraciones y los caudales de agua, se puede calcular el caudal del químico.

Como se necesita una aplicación por semana, serían 4 aplicaciones al mes, y consideraremos 5 horas de aplicación, lo que resultaría en un total de 20 horas de aplicación al mes.

Así, tenemos la dosis mensual de H_2SO_4 para las distintas dimensiones de planta, cuyo detalle se puede observar en la tabla 10.4 en el anexo.

Su comportamiento se puede observar en la figura 7.5.

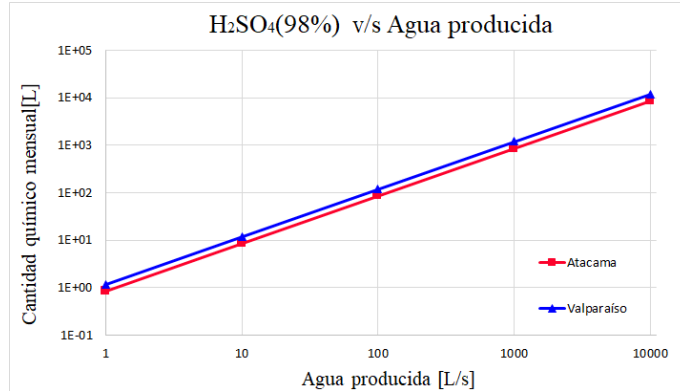


Figura 7.5: *Dosificación mensual de H_2SO_4 para distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia.*

Se puede observar que, aunque hay concentraciones distintas para las diferentes regiones (lo cual probablemente se deba a la diferencia de pH, ya que el ácido sulfúrico se está utilizando para ajustar el pH), ambos casos muestran un crecimiento proporcional entre el agua producida y la cantidad de químico necesaria.

Hipoclorito de Sodio ($NaOCl$), Metabisulfito de Sodio ($Na_2S_2O_5$) y Hexametáfosfato de Sodio ($Na_6P_6O_{18}$)

Considerando que los 3 se comportan de manera similar, y que tienen la misma dosis tanto para Atacama como para Valparaíso se decidió juntarlos en una sección.

En primer lugar, se tienen los caudales de los 3 químicos para las dos ubicaciones, que se obtuvieron de la modelación, y están en la tabla 7.7 y en la tabla 6.5. Con estas concentraciones y los caudales de agua, se puede calcular el caudal de cada químico.

- **Hipoclorito de Sodio:** Considerando meses de 30 días, se necesitarían 15 aplicaciones al mes, y considerando 5 horas de aplicación, sería un total de 75 horas de aplicación al mes. El detalle del resultado se puede ver en la tabla 10.5 del anexo.
- **Metabisulfito de Sodio:** Considerando un mes de 30 días, el químico sería aplicado por 180 horas al mes. El detalle del resultado se puede ver en la tabla se puede observar en la tabla 10.6 del anexo.
- **Hexametáfosfato de Sodio:** Considerando un mes de 30 días, el químico se aplicaría durante 720 horas al mes. El detalle del resultado se puede ver en la tabla se puede observar en la tabla 10.7 del anexo.

El comportamiento de los 3 químicos se puede observar en la figura 7.6.

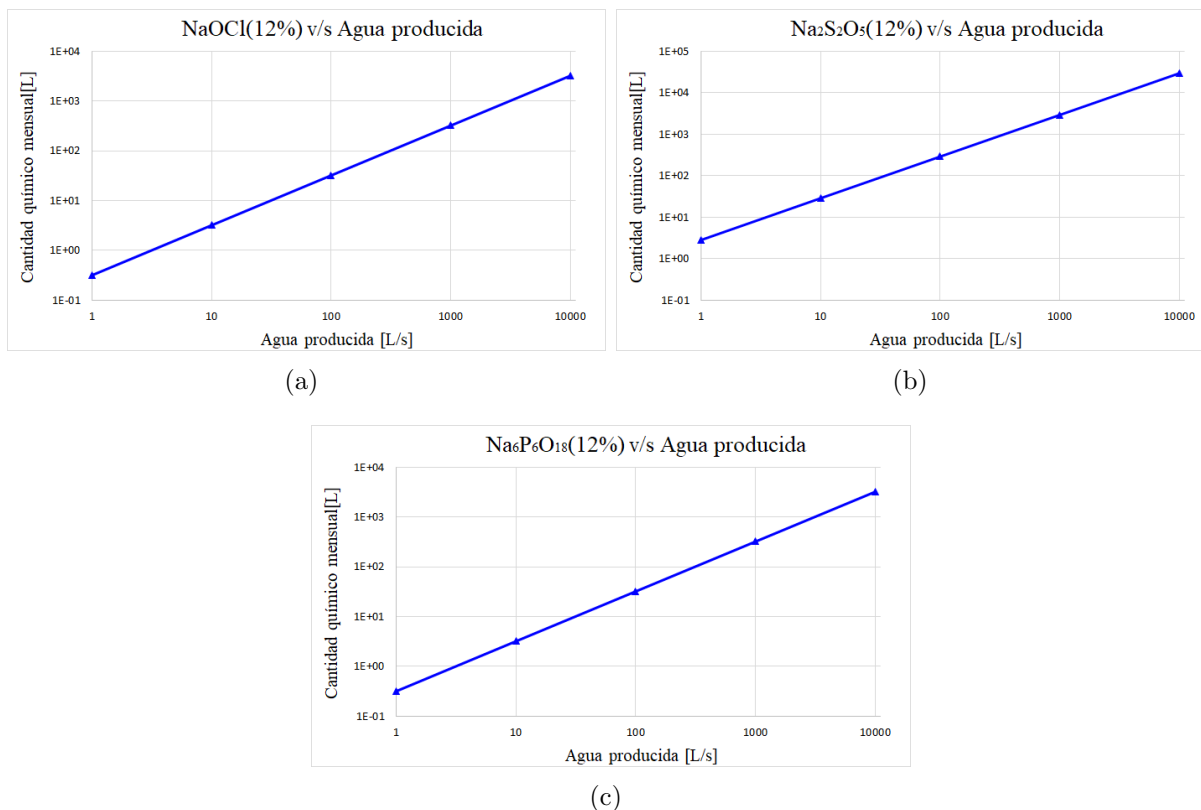


Figura 7.6: (a) Dosificación mensual de NaOCl para distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (b) Dosificación mensual de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ para distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (c) Dosificación mensual de $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ para distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia.

Respecto a los gráficos, se puede observar:

- **Hipoclorito de Sodio:** La concentración necesaria de hipoclorito de sodio es la misma para ambas modelaciones, por lo que la cantidad de químico va aumentando junto con el agua producida. El hipoclorito de sodio es usado para desinfección, y el hecho de que ambas aguas, a pesar de sus diferencias, necesiten la misma cantidad de cloro implica que tienen una demanda de cloro similar, lo cual indica que presentan contaminantes similares en términos de materia orgánica y otros compuestos que reaccionan con el cloro.
- **Metabisulfito de Sodio:** La concentración necesaria de hipoclorito de sodio es la misma para ambas modelaciones, por lo que la cantidad de químico va aumentando junto con el agua producida. Esto resulta lógico considerando que, si ambas aguas usaron la misma cantidad de tipo de cloro, para luego retirar este, y evitar el daño a las membranas, ambas aguas necesitarán la misma cantidad de químico para desclorar.

- **Hexametáfosfato de Sodio:** La concentración necesaria de hipoclorito de sodio es la misma para ambas modelaciones, por lo que la cantidad de químico va aumentando junto con el agua producida. Que ambas aguas necesiten la misma cantidad de anti-incrustante resulta lógico, considerando que su función es evitar que las sales y minerales presentes en el agua precipiten, y al ser agua de mar, es posible que ambas aguas presenten las mismas sales y minerales.

7.2.5. Cantidades de Químicos para la Limpieza de Membranas

Clean In Place (CIP)

Para la realización de los cálculos se estimará el intermedio de los tiempos de aplicación, por lo que se considerará una realización cada 3 meses, lo que equivale a 4 veces al año, con una duración de 45 minutos cada vez, resultando en un total de 3 horas al año. Para calcular la dosis necesaria, primero se calculan los caudales de químico, con los datos de la tabla 7.7, que proporciona las concentraciones, y luego estas se multiplican por el tiempo, entregando la dosis total utilizada en ese periodo.

Al no ser una periodicidad mensual, el resultado serán los litros por año en vez de por mes.

- **Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$ al 100 %):** La dosis de ácido cítrico es igual para ambos casos estudiados, el valor en detalle se expresa en la tabla 10.8 presente en el anexo, y su comportamiento se puede observar en la figura 7.7.
- **Ácido Clorhídrico (HCl al 32 %):** Las dosis de cada modelación se puede ver en detalle en la tabla 10.9 presente en el anexo, y su comportamiento se puede observar en la figura 7.7.
- **Hipoclorito de Sodio ($NaOCl$ al 12 %):** La dosis de hipoclorito de sodio es igual para ambas modelaciones, su valor en detalle se puede ver en la tabla 10.10 presente en el anexo, y su comportamiento se puede observar en la figura 7.7.
- **Hidróxido de Sodio ($NaOH$ al 50 %):** Las dosis de cada modelación se puede ver en detalle en la tabla 10.11 presente en el anexo, y su comportamiento se puede observar en la figura 7.7.

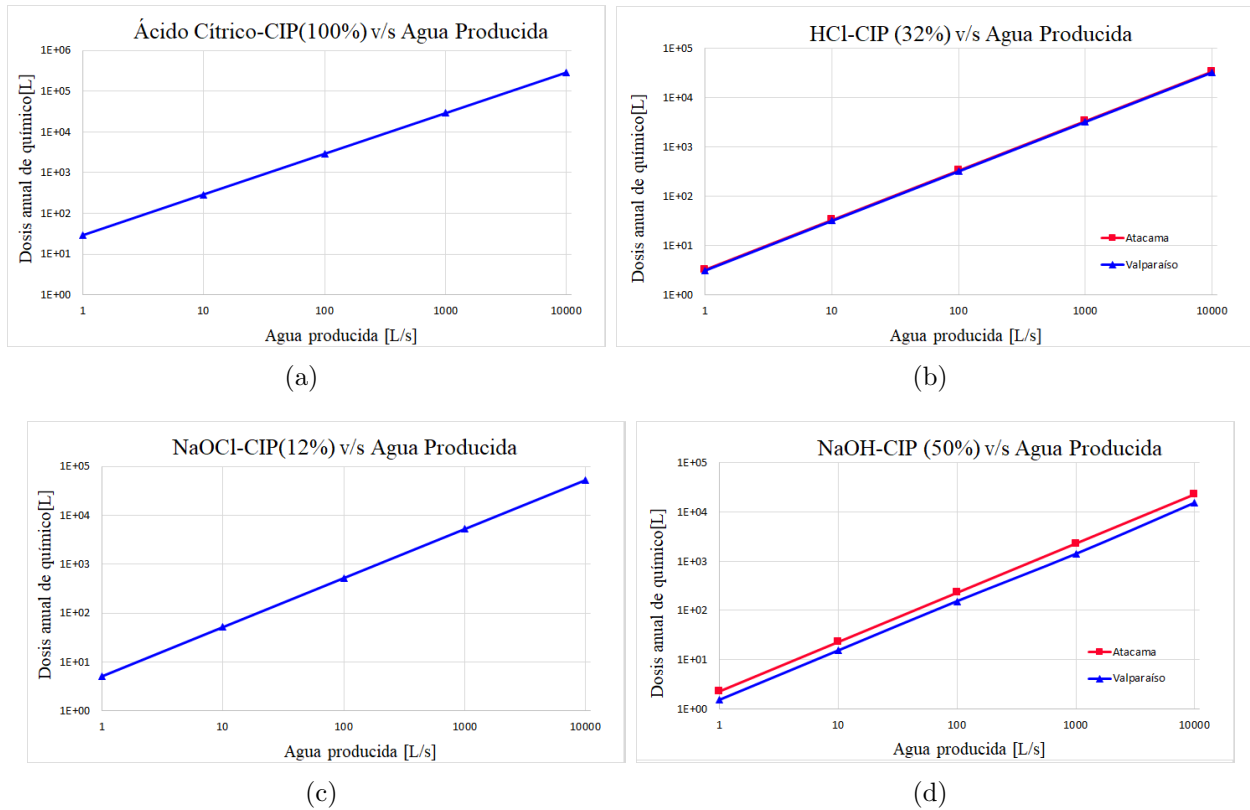


Figura 7.7: (a) Dosificación de ácido cítrico para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (b) Dosificación de ácido clorhídrico para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (c) Dosificación de hipoclorito de sodio para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia. (d) Dosificación de hidróxido de sodio para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia.

Respecto a los gráficos, se puede observar:

- **Ácido Cítrico:** El ácido cítrico elimina incrustaciones y material orgánico que se ha depositado en las membranas. Se puede observar que la cantidad de químico va aumentando de manera directamente proporcional con la producción de agua, y el hecho de que ambas modelaciones usen la misma cantidad de este químico sugiere agentes incrustantes similares en ambas aguas, lo que puede estar relacionado con la concentración de iones.
- **Ácido Clorhídrico:** Se puede observar que la dosis de químico va aumentando de manera proporcionalmente directa con el caudal de agua producida, además, la diferencia entre ambas modelaciones es pequeña, por lo que puede resultar un poco difícil de observar en el gráfico, siendo mayor la dosis para la simulación de Atacama. La mayor necesidad de HCl en esta modelación sugiere una mayor cantidad de contaminantes inorgánicos (Voutchkov, 2013) y/o una mayor probabilidad de incrustación (Wang et al., 2011) bajo las condiciones en Atacama,

en comparación con las condiciones en Valparaíso, como está especificado en la tabla 6.2.

- **Hipoclorito de Sodio:** Se puede observar que la cantidad de químico va aumentando de manera directamente proporcional con la producción de agua, y el hecho de que ambas modelaciones usen la misma cantidad de este químico sugiere que, a pesar de sus diferencias, ambas aguas causan un ensuciamiento similar, y dejan contaminantes con características parecidas en las membranas.
- **Hidróxido de Sodio:** Se puede observar que la dosis de hidróxido de sodio es mayor para la simulación de Atacama. Esto sugiere una mayor cantidad de contaminantes orgánicos (Voutchkov, 2013), lo cual concuerda con lo que se puede ver en sus condiciones especificadas en la tabla 6.2, que muestra una mayor cantidad de contenido orgánico total en la region de Atacama, en comparación con las condiciones para la región de Valparaíso. También podría deberse a que la temperatura afecte la acción del químico.

CEB (Chemically Enhanced Backwashing)

Para la realización de los cálculos se estimará el intermedio de los tiempos de aplicación, por lo que se usará una duración de 25 minutos por día, considerando 30 días al mes, lo que resulta en 12,5 horas al mes. Para calcular la dosis necesaria, primero se calculan los caudales de químico con los datos de la tabla 7.7, que proporciona las concentraciones, estas son multiplicadas por el tiempo, entregando la dosis de químico utilizada en ese periodo.

- **Ácido Clorhídrico (HCl al 32 %):** La dosis de cada modelación se puede ver en detalle en la tabla 10.12 presente en el anexo, y su comportamiento se puede ver en detalle en la figura 7.8.
- **Hipoclorito de Sodio ($NaOCl$ al 12 %):** La dosis de hipoclorito de sodio es la misma para ambos casos estudiados, los valores se expresan en detalle en la tabla 10.13 presente en el anexo, y su comportamiento se puede observar en la figura 7.8.

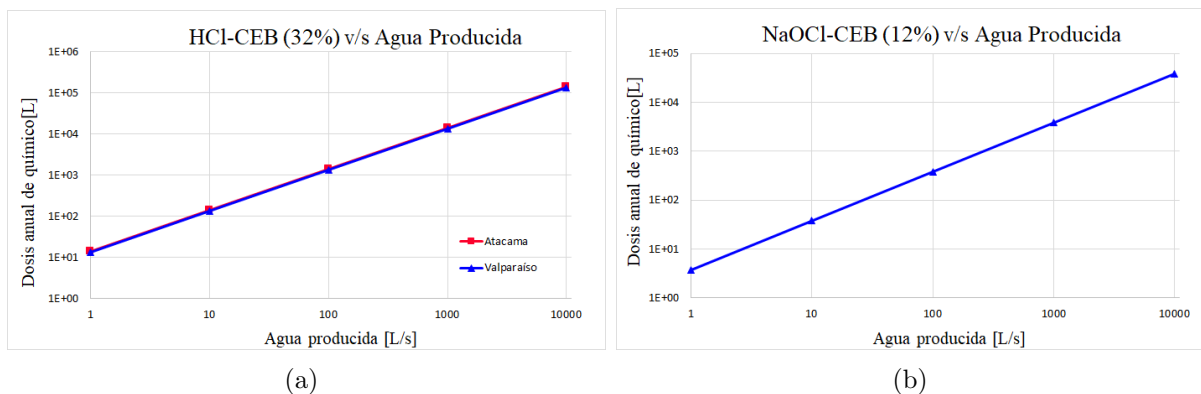


Figura 7.8: (a) *Dosificación de HCl para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia.* (b) *Dosificación de NaOCl para limpieza en distintos tamaños de plantas desalinizadoras modeladas. Elaboración propia.*

Respecto a los gráficos, se puede observar:

- **Ácido Clorhídrico:** Se puede observar que la dosis de ácido clorhídrico es mayor para la simulación de Atacama. De acuerdo con la literatura, esto sugiere una mayor presencia de contaminantes inorgánicos (Voutchkov, 2013) y/o una mayor probabilidad de que se generen incrustaciones (Wang et al., 2011).
- **Hipoclorito de Sodio:** Al tener ambos escenarios la misma dosificación del químico, se puede suponer que las variables que los diferencian, presentes en la tabla 6.2, no influyen en esta dosificación.

7.3. Acondicionamiento del Agua

Como se mencionó previamente, el agua puede necesitar ajuste de pH, remineralización del agua, adición de ciertos químicos y otros. Lo que necesite el agua puede variar según cual vaya a ser su uso final.

Los parámetros de olor y sabor pueden ser revisados de inmediato al tener el agua producto. Para efectos de este estudio, asumiremos que son adecuados.

La modelación indica que la turbidez y los sólidos disueltos totales son adecuados para ambas simulaciones, ya que estos, indicados en la sección “7.1. Resultados de la Modelación”, están dentro de los valores indicados por la norma, que se especifican en las tablas 6.9 y 6.8. Sin embargo, el pH está fuera de los rangos deseables, siendo demasiado ácido, con un valor de entre 5,1 y 5,2. Por lo tanto, será necesario realizar un ajuste de pH.

Por otro lado, la modelación no proporciona los valores finales de $CaCO_3$ y presenta una concentración de entre 0,34 y 0,70[mg/L] de Mg. Por lo tanto, para el $CaCO_3$ supondremos los valores típicos del agua desalinizada según la literatura, indicando una concentración de 23,0[mg/L](Saavedra F. et al., 2022)

Entonces, resulta necesario remineralizar el agua y ajustar su pH. Para esto, se pueden usar los lechos de piedra calcita, los cuales remineralizan el agua y ajustan el pH de entre 5,5 - 6,0 a entre 8,0 y 8,5 (Saavedra F. et al., 2022), lo que dejaría el agua con el pH adecuado.

7.3.1. Acondicionamiento del Agua para Consumo Humano

Remineralización

Si bien la OMS establece que es aceptable una dureza de hasta 130[mg/L], se considera mejor si esta está entre 80 y 100[mg/L]. Por lo tanto, estableceremos una dureza de 90[mg/L]. Además, se añadirá sulfato de magnesio para que este quede en una concentración cercana a 8[mg/L], esto para que sea cercana a lo adecuado, sin sobre pasarse. A partir de los datos disponibles, se obtienen los resultados que se pueden observar en la tabla 7.8.

Tabla 7.8: *Calcita, dióxido de carbono y sulfato de magnesio necesarios para remineralización del agua. Elaboración propia.*

Parámetro	Unidades	Valor
$CaCO_3$	[mg/L]	67,00
CO_2	[mg/L]	29,48
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	[mg/L]	43,29

Y al aplicar esas dosificaciones el agua queda remineralizada con los valores que se pueden ver en la tabla 7.9.

Tabla 7.9: *Valores agua remineralizada. Elaboración propia.*

Parámetro	Unidades	Valor
Dureza	[mg/L]	90
Mg	[mg/L]	7,64 - 8
pH	-	Cercano a 8

También resulta necesario saber el tamaño y la cantidad de lechos necesarios para el proceso. Esto lo hacemos utilizando las ecuaciones 6.5, 6.6 y 6.7, y así obtenemos los resultados de la tabla 7.10.

Tabla 7.10: *Características lechos necesarios para la remineralización de agua potable. Elaboración propia.*

Agua producida[L/s]	Superficie filtrante[m ²]	N°Lechos	Altura lecho[m]
1	0,31	1	3,83
10	3,13	3	3,83
100	31,30	24	3,83
1000	313,04	236	3,83
10000	3130,43	2359	3,83

Con los valores de la tabla 7.10 se tienen las dimensiones de los lechos necesarios para el proceso según el agua que producen. El número de lechos fue redondeado hacia arriba, ya que los lechos son enteros, no en fracción. Se puede ver que todo va aumentando de manera lineal al aumentar el requerimiento de agua.

Desinfección

Ahora, el agua cumple con todos los parámetros necesarios. Sin embargo, también debe cumplir con parámetros de desinfección, para lo cual se debe agregar cloro. Además, el agua potable en Chile debe contener flúor.

Las concentraciones de hipoclorito de sodio y fluoruro de sodio que se buscará alcanzar serán las que se pueden ver en la tabla 7.11.

Tabla 7.11: *NaOCl y NaF necesarios para agua potable. Elaboración propia.*

Parámetro	Unidades	Valor
NaOCl	[mg/L]	1,1
NaF	[mg/L]	0,8

Tanto la remineralización como la cloración y fluoración deben realizarse de manera continua, las 24 horas del día, la demanda diaria se puede ver en detalle en la tabla 10.14, presente en el anexo.

Además, relación entre los distintos químicos necesarios para la potabilización del agua y el agua producida puede verse con mayor claridad, en el gráfico de la figura 7.9

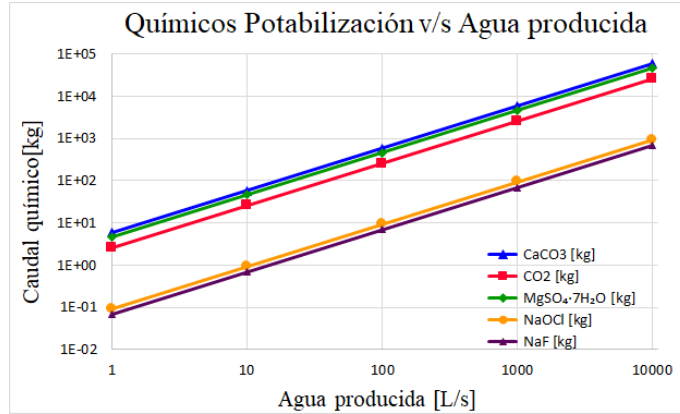


Figura 7.9: *Químicos necesarios diariamente para potabilizar el agua*

Se puede observar una relación lineal entre la producción de agua y la demanda de los distintos químicos.

7.3.2. Acondicionamiento del Agua para Minería

Remineralización

Se usará un lecho de calcita, cuya reacción se puede ver en la ecuación 6.1, expresada anteriormente. Como fue previamente mencionado, con esta reacción, por cada 1[mg/L] de dureza aumentados (1 [mol/L]), se necesitan 1[mg/L] de $CaCO_3$ y 0,44[mg/L] de CO_2 (Voutchkov, 2013).

De esta manera, determinando como objetivo una dureza de 80[mg/L], y considerando que el agua desalada tiene una dureza inicial de 23,0, como se mencionó previamente, se pueden obtener la calcita y dióxido de carbono necesarios en la tabla 7.12.

Tabla 7.12: *Calcita y dióxido de carbono necesarios para remineralización del agua para minería. Elaboración propia.*

Parámetro	Unidades	Valor
$CaCO_3$	[mg/L]	57,00
CO_2	[mg/L]	25,08

Con esto, el agua estaría lista para su uso en minería, ya que el agua para este fin no requiere de desinfección en la fase de post-tratamiento (Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC), 2010).

La cantidad y tamaño de los lechos necesarios para el proceso es la misma que en el agua potable, se calculan utilizando las ecuaciones 6.5, 6.6 y 6.7, y se pueden observar en la tabla 7.10

La remineralización se realiza de manera constante, las 24 horas al día, la demanda diaria se puede ver en detalle en la tabla 10.15, presente en el anexo.

Además, la relación entre los distintos químicos necesarios para el acondicionamiento del agua y el agua producida puede verse de igual manera, con mayor claridad, en el gráfico 7.10

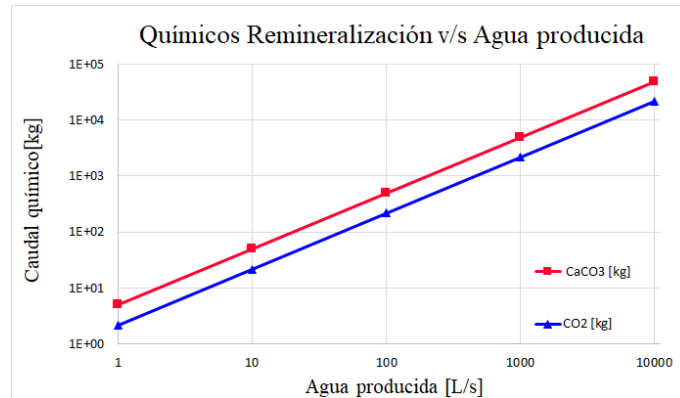


Figura 7.10: *Químicos necesarios diariamente para agua para minería*

Se puede observar una relación lineal entre la producción de agua y la demanda de los distintos químicos.

7.3.3. Acondicionamiento del agua para agricultura

Remineralización

Se usará nuevamente el lecho de calcita, cuya reacción se puede ver en la ecuación 6.1, expresada anteriormente.

Como ya se había mencionado, con esta reacción, por cada 1[mg/L] de dureza aumentados (1 [mol/L]), se necesitan 1[mg/L] de $CaCO_3$ y 0,44[mg/L] de CO_2 (Voutchkov, 2013).

De esta manera, determinando como objetivo una dureza de 125[mg/L], y considerando que el agua desalada tiene una dureza inicial de 23,0, como se indicó previamente, se pueden obtener la calcita y dióxido de carbono necesarios en la tabla 7.13.

Tabla 7.13: *Calcita y dióxido de carbono necesarios para remineralización del agua para riego. Elaboración propia.*

Parámetro	Unidades	Valor
$CaCO_3$	[mg/L]	102,00
CO_2	[mg/L]	44,88

Con esto, el agua estaría lista para su uso en riego, ya que para este fin no se requiere desinfección (Saavedra F. et al., 2022). Si bien este agua podría beneficiarse de la adición de otros minerales, estos pueden variar según los cultivos a regar y pueden ser suplidos mediante abono, por lo que no son necesarios.

La cantidad y tamaño de los lechos necesarios para el proceso es la misma que en el agua potable, se calculan utilizando las ecuaciones 6.5, 6.6 y 6.7, y se pueden observar en la tabla 7.10

La remineralización se realiza de manera constante, las 24 horas al día, la demanda diaria se puede ver en detalle en la tabla 10.16, presente en el anexo.

Además, la relación entre los distintos químicos necesarios para el acondicionamiento del agua y el agua producida puede verse de igual manera, con mayor claridad, en el gráfico 7.11

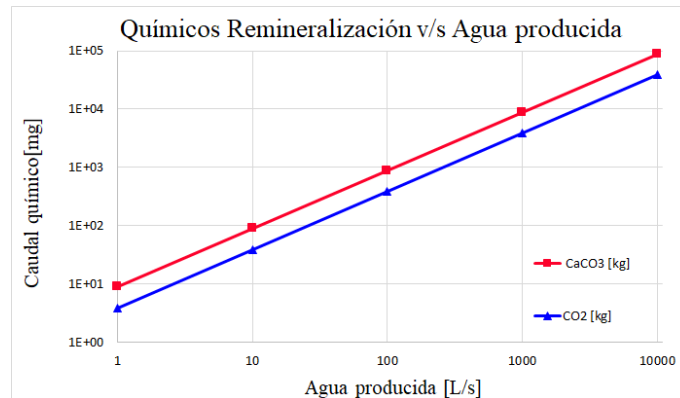


Figura 7.11: *Químicos necesarios diariamente para agua para agricultura*

Se puede observar una relación lineal entre la producción de agua y la demanda de los distintos químicos.

7.4. Validación de la Modelación

7.4.1. Cantidad de Membranas

Número de Membranas

Para validar el número de membranas obtenidas de la modelación, se pueden usar las siguientes ecuaciones obtenidas de la literatura, que deberían las mismas seguidas por el programa:

En primer lugar, se debe calcular el área necesaria para el caudal de agua que está pasando. Para esto tenemos la ecuación 7.1 (Voutchkov, 2013).

$$Area = \frac{Q_{agua}}{Flux} \quad (7.1)$$

Donde:

- *Area*: Es el área total necesaria para el caudal de agua que se está tratando, sus unidades son $[m^2]$.
- *Q_{agua}*: Caudal de agua tratado, sus unidades son $[\frac{L}{s}]$.
- *Flux*: Caudal de agua a través de una membrana por unidad de área, sus unidades son $[\frac{L}{m^2h}]$.

Ahora teniendo el área de membrana necesaria, se puede calcular el número de membranas necesario, esto mediante la ecuación 7.2 (Voutchkov, 2013).

$$Membranas = \frac{Area}{Area_{membrana}} \quad (7.2)$$

Donde:

- *Membranas*: Número de membranas.
- *Area*: Área total necesaria, sus unidades son $[m^2]$.
- *Area_{membrana}*: Área para cada membrana, es un dato dado por el fabricante, sus unidades son $[m^2]$.

Con estas ecuaciones obtenemos las membranas necesarias para las distintas plantas, como se puede ver en la tabla 7.14, los valores varían al considerar el agua de entrada de cada modelación.

Tabla 7.14: *Cálculo de membranas. Elaboración propia.*

Agua producida[L/s]	Atacama		Valparaíso	
	Ultrafiltración	Ósmosis inversa	Ultrafiltración	Ósmosis inversa
1	4	4	3	4
10	31	33	34	33
100	304	321	335	321
1000	2985	3205	3365	3205
10000	30385	32045	32777	32045

El valor de las membranas fue estimado hacia arriba, ya que no se puede usar una fracción de membrana.

Luego, se calcula el error, utilizando la ecuación 7.3 para verificar si los datos de la modelación, indicados en la tabla 7.6, son adecuados. Los valores resultantes se presentan en la tabla 7.15.

$$\text{Error} = \frac{|\text{Valor Calculado} - \text{Valor Modelación}|}{|\text{Valor Calculado}|} \times 100 \% \quad (7.3)$$

Tabla 7.15: *Error en valores de membranas. Elaboración propia.*

Agua producida[L/s]	Atacama		Valparaíso	
	Error Ultrafiltración [%]	Error Ósmosis inversa [%]	Error Ultrafiltración [%]	Error Ósmosis inversa [%]
1	0,00	0,00	33,33	0,00
10	3,23	3,03	17,65	3,03
100	6,58	0,31	12,84	0,31
1000	8,54	0,16	17,68	0,16
10000	8,61	0,14	0,68	0,14

Se puede notar que los errores son consistentemente bajos, lo que indica que los valores derivados de la modelación son apropiados.

7.4.2. Valores de Energía

Para validar los valores de la energía, se buscaron valores en la literatura. Como se pudo observar, los valores de energía específica se mantienen de manera relativamente constante, independientemente del tamaño de la planta. Los valores de energía para los distintos procesos se pueden observar en la tabla 7.16.

Tabla 7.16: *Tabla comparativa valores de energía. Elaboración propia.*

Estudio	Ultrafiltración	Osmosis Inversa
	Energía Específica [kWh/m ³]	Energía Específica [kWh/m ³]
<i>Matsuyama et al., 2021</i>	0,124	-
<i>Porada et al., 2020</i>	-	4
<i>Alsarayreh et al., 2020</i>	-	2-5
<i>Tufa et al., 2019</i>	-	3 - 5
<i>Kim et al., 2019</i>	-	3,5 - 4,5
<i>Touati et al., 2018</i>	0,1	-
<i>Lau et al., 2014</i>	0,07	-
<i>Raluy et al., 2006</i>	-	4

Podemos observar que los valores obtenidos, que se presentan en las tablas 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5, se encuentran en el rango o cercanos a los valores de la literatura, sin embargo los superan, esto se debe a que el programa WAVE no utiliza sistemas de recuperación de energía, generando un mayor gasto energético (DuPont, 2019).

Además, utilizando valores medios, podemos calcular un error promedio para las energías. Los resultados se muestran en la tabla 7.17. Para esto consideraremos como energía de la literatura un promedio de las energías señaladas en la tabla 7.16, y también un promedio de la energía específica de cada modelación.

Tabla 7.17: *Tabla comparativa valores de energía. Elaboración propia.*

Energía			
	Energía literatura [kwh/m ³]	Energía modelación [kwh/m ³]	Error %
Ultrafiltración Atacama	0,098	0,08	18,37
Ultrafiltración Valparaíso		0,082	16,33
Ósmosis Inversa Atacama	3,875	4,54	17,16
Ósmosis Inversa Valparaíso		4,802	23,92

Al calcular el error, podemos observar valores de error bajos, pero no despreciables, lo que se puede explicar debido al no uso de los sistemas de recuperación de energía.

7.4.3. Dosis de Químicos

Para validar las dosificaciones de químicos, se buscaron valores en la literatura para comparar y determinar si los obtenidos se encuentran dentro del rango adecuado.

Los valores obtenidos de la literatura se presentan en la tabla 7.18.

Tabla 7.18: *Tabla comparativa dosis de químicos. Elaboración propia con datos de (DuPont, 2022; Guajardo Arriagada, 2023; Voutchkov, 2013).*

Químico	Dosis Literatura[mg/L]	Programa	
		Dosis Atacama[mg/L]	Dosis Valparaíso [mg/L]
Ácido Cítrico	2000 - 3000	2000	2000
Ácido Clorhídrico - CEB1	0-10000	512	495
Ácido Clorhídrico - CIP	0-10000	512	495
Ácido Sulfúrico	0-30	10	14
Hipoclorito de Sodio	0-15	5	5
Hipoclorito de Sodio CEB2	0-500	350	350
Hipoclorito de Sodio CIP	0-2000	2000	2000
Hidróxido de Sodio	0-500	407	271

Podemos observar que los valores obtenidos de la modelación, presentes en la tabla 7.7, se encuentran dentro del rango de los valores de la literatura. Por lo tanto, se pueden considerar los valores de la modelación como apropiados.

Capítulo 8

Discusión de Resultados

Para poder realizar un análisis respecto a los consumos de energía y materiales de las plantas de ósmosis inversa, y analizar sus ventajas y/o desventajas, se compararán los valores obtenidos con respecto a otros métodos de obtención de agua.

Para la comparación se utilizarán dos métodos de desalinización, que son usados en la actualidad, comparando distintos factores de importancia para el proceso.

Los métodos que se usarán de comparación son los siguientes:

1. **Electrodiálisis:** Se abrevia como (ED), y es un método de desalinización por membrana. Se basa en una membrana impulsada por voltaje que causa un transporte selectivo de iones por medio de un gradiente eléctrico. El sistema contiene membranas de intercambio aniónico y catiónico alternadas entre un cátodo y un ánodo. Los sistemas generan agua desalinizada de alta pureza (Panagopoulos et al., 2019).
2. **Destilación flash multi-etapa:** La destilación flash multi-etapa, abreviada (MSF) por sus siglas en inglés, es un método de desalinización térmica. El proceso se basa en el principio de la evaporación flash, evaporando el agua a una baja presión, el proceso es repetido en múltiples unidades flash sucesivas, donde una parte de la solución es evaporada y posteriormente condensada, generando finalmente una agua dulce (Panagopoulos et al., 2019).

Para la comparación, en la ósmosis inversa se usarán los valores obtenidos de la modelación y los calculados a partir de esta, y en los otros dos se usarán los valores de la literatura debidamente referenciados. La comparación se puede observar en la tabla 8.1.

Tabla 8.1: Comparación en distintos métodos (Panagopoulos et al., 2019); (Schantz et al., 2018); (Voutchkov, 2013); (Campioni et al., 2018); (Doornbusch et al., 2020).

Método	Energía[kwh/m ³]	Salinidad preferida de entrada	Pretratamiento	Calidad agua producida	Post-tratamiento
<i>Ósmosis Inversa</i>	4,14 - 4,91	Cualquiera	Necesario	TDS=20-50[mg/L]	Necesario
<i>Electrodialisis</i>	3,6 - 6,6	Media (Agua salobre)	Necesario	TDS=350-500[mg/L]	Necesario
<i>Destilación flash Multietapa</i>	12,5-24	Alta	Poco necesario	Pura	Poco necesario

Cada método presenta sus ventajas y desventajas, como será discutido mas adelante, buscando comprender el método que presente más ventajas y menos desventajas con respecto a los otros.

Para poder hacer una comparación más clara entre los métodos, se realizó un gráfico radial, donde se pueden comparar todos los aspectos entre los 3 métodos.

El gráfico fue realizado asignando a los distintos parámetros valores de entre 0 y 3, siendo 3, que en el gráfico es lo más alejado del centro, lo menos conveniente, y 0, que es el centro, lo más conveniente. Los valores de energía y calidad del agua fueron convertidos a estos valores con proporciones. Así se puede ver la comparación de manera gráfica en la figura 8.1.

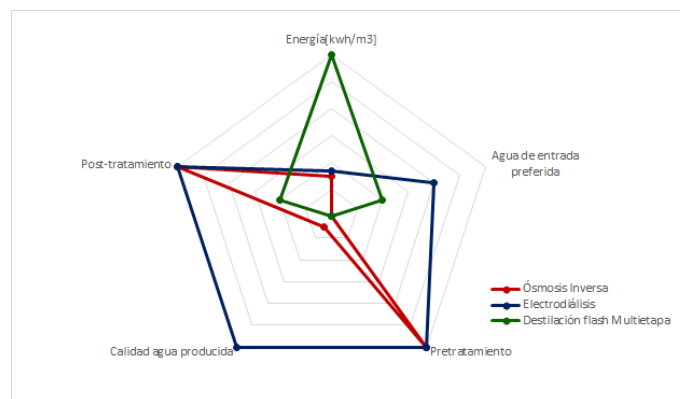


Figura 8.1: Comparación distintos métodos. Elaboración propia.

Si observamos el gráfico, en primer lugar, la ósmosis lleva la ventaja en el área energética y en el agua de entrada preferida, ya que en promedio es el método que gasta una menor cantidad de energética, y además es útil para cualquier agua de entrada y genera un agua con una concentración de sólidos bastante baja. Sin embargo necesita un pre y post tratamiento, todo lo cual implica un mayor uso de químicos, aunque esto puede variar según el agua de entrada y lo que indique la legislación para el agua de salida, que también varía según cuál vaya a ser el uso final de esta.

Por otro lado, la electrodialisis, si bien tiene un promedio de gasto energético poco mayor que la ósmosis inversa, sigue siendo un gasto mayor. Además, el método usa como agua de entrada el agua salobre, limitando su uso a aguas de una mayor salinidad, y requiere de pre y post tratamiento, además de tener una mayor concentración final de sólidos en el agua final, aumentando su consumo de químicos para una calidad adecuada del agua final, aunque esto puede variar según el agua de entrada y lo que indique la legislación para el agua de salida, que también varía según cuál vaya a ser el uso final de esta.

Finalmente, en el caso de la destilación flash multi-etapa, parece presentar bastantes ventajas respecto a los otros métodos, ya que requiere poco pre-tratamiento, e incluso algunas fuentes (Wang et al., 2011) indican que no requiere de pre-tratamiento, además genera un agua pura, y necesita poco post-tratamiento, todos estos ámbitos, de igual manera que en los métodos anteriores pueden variar según el agua de entrada y lo que indique la legislación para el agua de salida, que también varía según cuál vaya a ser el uso final de esta. Sin embargo, este método tiene la desventaja no menor del gran consumo energético, que puede aumentar el impacto ambiental y los costos del proceso, por lo que, si bien puede resultar conveniente en la mayoría de los puntos de comparación, no es un método muy usado.

En las siguientes secciones se considerarán y compararán todos los ámbitos analizados durante el trabajo.

8.1. Consumo energético

Los métodos de desalinización requieren de electricidad para su funcionamiento, esto para la operación de los equipos, procesos, transporte, etc.

8.1.1. Implicaciones del Consumo Energético

En general, un mayor consumo energético va a traer consigo un mayor impacto ambiental, sin embargo, la magnitud de este impacto puede variar según la matriz energética, y mientras un mayor sea el porcentaje de las energías renovables, menor será el impacto, sin embargo, el porcentaje de plantas de desalinización que usan energía renovable no llegaba al 1 % al año 2017, y las plantas de mayor tamaño son operadas bajo combustibles fósiles (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

En el área económica, un aumento en el consumo energético implica inevitablemente mayores costos de producción. Este fenómeno se hace especialmente importante en el contexto de la desalinización térmica, que demanda un consumo energético considerablemente más elevado. Es importante

señalar que los costos asociados pueden fluctuar según la ubicación geográfica, el tipo de energía empleada y las condiciones temporales; sin embargo, la relación entre un mayor consumo energético y un gasto más elevado es una constante que prevalece.

La demanda energética además, puede presentar una limitación para el funcionamiento de las plantas desalinizadoras, ya que sin acceso a la energía no pueden realizar el proceso. Esto puede ser especialmente limitante en lugares alejados de las grandes ciudades y en las zonas más periféricas. Sin embargo, esto podría solucionarse potenciando el uso de las energías renovables, cuyo desarrollo podría mejorar las posibilidades para estas zonas (Comité Científico de Cambio Climático, 2022).

Con respecto a los otros métodos, la ósmosis inversa resulta el método más conveniente y eficiente en términos de consumo energético y costos de producción, considerando también que, aunque en términos de energía la electrodialisis tiene valores cercanos, no es capaz de manejar el agua con mayor salinidad, lo que disminuye su conveniencia para el proceso (Comité Científico de Cambio Climático, 2022).

En las modelaciones realizadas, se pudo observar que las condiciones del agua producen una variación en la energía necesaria para el proceso, ya que al usar dos aguas distintas los resultados, aunque cercanos, fueron diferentes. Esto es debido a que una mayor salinidad, mayor cantidad de sólidos en el agua, y mayor cantidad de solutos en general, aumenta la fuerza que se debe aplicar sobre la membrana, consumiendo más energía (Comité Científico de Cambio Climático, 2022). Esto resulta importante también al comparar con otros métodos, ya que el promedio de energía considerado en la ósmosis inversa es para agua de mar, mientras la electrodialisis, si bien tiene valores cercanos, es para agua salobre, para la cual la ósmosis necesitaría menos energía (Doornbusch et al., 2020). Esta consideración es importante, ya que una de las mayores fuentes de agua para la desalinización es el mar, y las condiciones de este generan un mayor gasto energético.

8.1.2. Posibilidades de reducción de Consumo Energético

El proceso necesita de energía para su funcionamiento, en el caso de la ósmosis inversa, cuanto mayor sea la salinidad, cantidad de sólidos, y otros solutos en el agua, mayor es la resistencia de la membrana, por lo que se requiere de una mayor presión aplicada sobre esta, lo cual aumenta los requerimientos energéticos (Schantz et al., 2018).

Considerando esto, para reducir el consumo energético existen diferentes opciones.

1. **Calidad del agua:** La salinidad y los sólidos en el agua de las distintas costas pueden variar

según la temperatura, o por flujos de agua dulce o salada que lleguen a estas, causando mayor salinidad o dilución, también pueden variar según las corrientes y según el fondo marino, todos estos factores además, no son constantes, por lo que podrían aumentar o disminuir en el tiempo (Rahimah et al., 2021). La variabilidad de estos factores dificulta el elegir un lugar con mejores condiciones de ese tipo, pero de igual manera puede considerarse.

2. **Pre-tratamiento:** Un buen pre-tratamiento puede disminuir la cantidad de solutos en el agua, ayudando a que se requiera menos esfuerzo para traspasar las membranas y así un menor uso de energía (Voutchkov, 2013).
3. **Dispositivos de recuperación de energía:** Estos ya fueron mencionados previamente en los impactos ambientales, y son dispositivos que se agregan en el sistema, y son capaces de recuperar y reutilizar energía liberada durante el proceso, lo que disminuye el consumo de energía total en el sistema (Nashed & Van Dang, 2022). Actualmente estos dispositivos ya son usados, y han logrado disminuir considerablemente los gastos energéticos en la ósmosis inversa, por lo que seguir usándolos y mejorando sus diseños para una mayor recuperación podría tener mejores resultados.
4. **Aumento de la temperatura:** Como ya fue mencionado previamente, una mayor temperatura del agua disminuye la viscosidad del agua de mar, aumentando la permeabilidad de la membrana, esto causa una menor resistencia, por lo que se necesita menos energía para llevar a cabo el proceso (Voutchkov, 2013). Sin embargo, la alta temperatura daña las membranas, por lo que es importante considerar esto, y también asegurarse que el aumento de temperatura no acabe usando la energía que está disminuyendo del proceso, causando al final el mismo consumo.

8.2. Consumo de Materiales

8.2.1. Implicaciones del Consumo de Materiales

Aunque las membranas deberán tener una vida de hasta 10 años, en la realidad su vida útil suele ser menor debido a las condiciones del agua y de la planta, este mayor consumo y desecho de membranas tiene también impactos económicos. En primer lugar está el gasto evidente de la compra de membranas para reemplazar las membranas que ya no pueden seguir utilizándose, y además está el gasto de disposición final de las membranas, el cual puede variar según las normas del lugar y la disposición final que se le decida dar a las membranas (Khanzada et al., 2024).

8.2.2. Posibilidades de reducción del Consumo de Materiales

Actualmente el proceso necesita la cantidad de membranas calculada, y estas no se pueden disminuir, por lo que para poder disminuir la cantidad de membranas necesarias, es necesario disminuir su consumo, es decir aumentar su vida útil.

Esta disminución es posible mediante el cuidado adecuado de las membranas. Para esto se pueden implementar las siguientes medidas:

- **Uso un buen tamiz o pre-filtro:** Esta práctica retiene parte de los sólidos presentes en el agua que ingresa al proceso, especialmente aquellos de mayor tamaño que podrían dañar las membranas.
- **Químicos de Pre-tratamiento:** Se usan para garantizar que el agua esté en las condiciones adecuadas para el proceso, asegurándose de optimizar el rendimiento y eficiencia del proceso. Además son capaces de eliminar parte de los sólidos suspendidos y prevenir la formación de incrustaciones, todo esto contribuye a la protección de las membranas.
- **Químicos de Limpieza:** Una limpieza correcta y regular de las membranas es fundamental para mejorar su eficiencia y prolongar vida útil, ya que ayudan a eliminar incrustaciones y otras impurezas que se van acumulando en las membranas.
- **Protección de la membrana:** Además de los puntos mencionados previamente, que cuidan la membrana, también es importante ser cuidadoso con no someterla a condiciones que pueden dañarla o disminuir su tiempo de vida, tales como muy altas temperaturas o químicos que las dañan, tales como el cloro.

Una disminución del consumo de membranas puede resultar en beneficios económicos y ambientales. Por un lado, se reduce el gasto de comprar nuevas membranas, impactando positivamente en los costos operativos. Por otro lado, disminuir la cantidad de membranas desechadas, reduce la cantidad de residuos generados, esto es un beneficio ambiental al disminuir los desechos que requieren disposición final.

8.3. Consumo de Químicos de Pre-tratamiento y Limpieza

8.3.1. Implicaciones del Consumo de químicos de pre-tratamiento y limpieza

Los químicos de pre-tratamiento y limpieza tienen gran importancia en el proceso, sin embargo, parte de estos químicos son vertidos de vuelta al mar en el proceso de descarga, lo cual puede tener efectos negativos en el ecosistema marino. Esto debido a que aunque estos químicos son necesarios

para tratar el agua y hacerla potable para el consumo humano, eliminando los microorganismos y cambiando el pH, estos mismos efectos son perjudiciales en el ecosistema marino.

A pesar de esto, los químicos son necesarios, en primer lugar para el cuidado de las membranas, y también para que el proceso sea llevado a cabo de manera adecuada, ya que el agua debe estar bajo ciertas condiciones para que el proceso pueda ser llevado a cabo lo mejor posible.

Además, los químicos desinfectantes pueden eliminar posibles bacterias o microorganismos que podrían ser peligrosos para la salud humana, los cultivos y/o los animales.

La cantidad de químicos necesaria puede ser variable según las características del agua del lugar y si hay presencia o no de bacterias u otros microorganismos (Voutchkov, 2013).

8.3.2. Posibilidades de reducción del Consumo de Químicos de pre-tratamiento y limpieza

Si bien los químicos son necesarios según las características del agua, estas varían las cantidades, pero, como ya fue mencionado anteriormente, las características del agua no son constantes en el tiempo, por lo que se deben buscar otras formas de disminuir estos químicos.

Una manera de disminuir los químicos necesarios para el proceso sería la mejora del pre-tratamiento físico, ya que mientras más efectivo sea este, menor cantidad de químicos serán necesarios para el proceso.

También se puede investigar y buscar el uso de químicos más eficientes. Dado que distintos químicos pueden cumplir la misma función, es posible encontrar alternativas que requieran cantidades menores. Esto podría reducir el uso total de químicos en el proceso, aunque sería necesario investigar los impactos ambientales de estas nuevas opciones para asegurarnos de que realmente se disminuyan los efectos negativos en el medio ambiente.

Finalmente, otra forma de disminuir los químicos es la reutilización y reciclaje de estos, siempre que sea posible se pueden implementar métodos de reciclaje de los químicos usados, lo cual disminuiría la cantidad de químicos usada y además disminuiría los residuos.

8.4. Consumo de Químicos en Acondicionamiento

El acondicionamiento es sumamente necesario, ya que el agua resultante del proceso, aunque purificada, no se encuentra en condiciones adecuadas para su uso. La necesidad de acondicionamiento varía según la aplicación final del agua producida, así como las condiciones finales del agua al término del proceso. Sin embargo, en este estudio, el acondicionamiento será el mismo para ambas modelaciones, dado que el modelo no proporcionaba la dureza final del agua, por lo que se optó por un valor estándar tomado de la literatura.

Aunque los requisitos pueden variar según cual sea el uso final que se le va a dar al agua, el agua para consumo humano es la que demanda un tratamiento más intensivo, incluyendo aumento de dureza y pH, adición de magnesio y desinfección. Le sigue en consumo el agua para agricultura, que además del aumento de dureza puede requerir otros químicos dependiendo del tipo de cultivo, los cuales pueden ser suplidos con fertilizantes. Por último, el agua para minería requiere un aumento de dureza y pH menores, destinados principalmente a prevenir la corrosión en equipos y tuberías.

8.4.1. Implicaciones del Consumo de químicos en acondicionamiento

El uso de químicos tiene impactos ambientales, ya que su uso puede llevar a la generación de efluentes que de no ser tratados adecuadamente pueden resultar en daños al ecosistema. Además, gran parte de estas aguas, después de tratada entra a la red, ya sea por las casas o por la industria, y el agua de riego llega directamente al suelo, por lo que, los químicos pueden causar daños en el ecosistema si no están en las cantidades adecuadas (Elsaid et al., 2020).

El acondicionamiento del agua está regulado según la legislación de la zona, por lo que además, debe asegurarse que se deje el agua bajo las condiciones adecuadas, primero para la seguridad de las personas y el medio ambiente, y también para evitar multas o repercusiones legales. Este tipo de situaciones podría traer consecuencias económicas, y es también importante para la percepción de la población, por lo que se debe entregar un agua en condiciones adecuadas.

8.4.2. Posibilidades de reducción del Consumo de químicos en acondicionamiento

La reducción de estos químicos es difícil, ya que son necesarios por la ley para que el agua esté en condiciones adecuadas. Sin embargo, al igual que con los químicos anteriores, se pueden buscar químicos que sean más efectivos usando menos cantidades, también mientras se van desarrollando nuevas tecnologías se pueden ir actualizando las leyes, ya que, por ejemplo, la desinfección por luz

uv generaría un menor uso de químico, pero actualmente la ley no lo permite.

8.5. Estrategias para mejora

Para poder mejorar la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental causado por las plantas de desalinización mediante ósmosis inversa se pueden implementar distintas mejoras, las cuales serán separadas por área.

8.5.1. Mejoras asociadas a la energía

Los valores de energía en el agua de mar han bajado considerablemente con el tiempo, sin embargo aún se podrían aplicar mejoras al proceso para disminuir el consumo, los gastos y/o los impactos ambientales en el proceso.

Hay mejoras que se podrían implementar que no serán mencionadas, porque fueron mencionadas anteriormente, tales como el uso de dispositivos de recuperación de energía y de energías renovables, estas medidas son usadas actualmente con buenos resultados.

Algunas otras posibles mejoras podrían ser:

Optimización del proceso

En primer lugar, para comenzar con las mejoras, sería bueno realizar un análisis detallado de los procesos de la planta, esto con el fin de identificar áreas de mejora, pérdidas que podrían evitarse o disminuirse, materiales, procedimientos, etc.

La optimización del procedimiento puede minimizar costos, además de asegurar la confiabilidad del proceso, buscando los tamaños óptimos, operación, tiempos óptimos, y otros (Okampo & Nwulu, 2021).

Investigación

Se podría investigar para elegir las membranas con un menor requerimiento energético en el proceso, sin embargo, esto debe ir de la mano con la consideración de la eficiencia del proceso, ya que una membrana con un menor requerimiento energético podría ser menos efectiva para el proceso, lo cual sería inconveniente para la meta.

Además, se puede investigar por nuevas tecnologías y procesos con una mejor eficiencia energética pero que sigan siendo igual o mejores en cuanto eficiencia del proceso.

8.5.2. Mejoras asociadas al uso de químicos

Los químicos son necesarios en el proceso, ya sea para pre-tratamiento, limpieza, o para acondicionamiento. Estos tienen gran importancia durante la desalinización, ya que aseguran la obtención de un agua segura y con las características adecuadas, mientras también cuidan los equipos y aseguran un buen funcionamiento del proceso.

A pesar de esto, parte de los químicos es desechada y acaba en el medio ambiente, teniendo impactos en este, por lo que la búsqueda de mejoras es importante. Algunas posibles mejoras podrían ser:

Recuperación de químicos

Actualmente entre los métodos para tratar con la descarga está el recuperar sales y con métodos parecidos también se podría buscar recuperar los químicos, de esta manera se necesitaría una menor cantidad de químicos, disminuyendo costos e impacto ambiental.

Optimización del proceso

Se podría analizar el proceso, buscando identificar áreas de mejora, pérdidas que podrían evitarse o reducirse, procedimientos, y otros, esto con el fin de reducir el uso de químicos buscando aplicarlos en el mejor momento, o buscando el químico que cumpla la función de manera adecuada, pero que tenga el menor impacto ambiental. Esto podría reducir costos y minimizar el impacto ambiental.

Investigación

Se podrían investigar métodos que puedan reemplazar, o al menos disminuir los químicos utilizados, tales como la desinfección UV en lugar del cloro.

Este tipo de nuevos métodos podría o no tener un menor valor económico, pero si que podría disminuir los impactos ambientales.

8.5.3. Mejoras asociadas a las membranas

Las membranas son el corazón del proceso de ósmosis inversa, sin ellas el proceso no puede ocurrir, sin embargo, estas cumplen con su vida útil, y luego pasan a ser residuos sólidos, aumentando la

cantidad de basura en el planeta.

Algunas de las mejoras que se podrían implementar son:

Investigación

Se podría invertir en la investigación para desarrollar membranas mas duraderas, ya que una vida más larga de las membranas podría disminuir significativamente la basura generada al disminuir la frecuencia de reemplazo.

Si las membranas tuvieran una mayor vida útil se podría disminuir el costo económico, y además el impacto ambiental asociado a la producción y al desecho de las membranas.

A su vez, se podrían investigar métodos de limpieza más eficientes y avanzados, los cuales podrían aumentar la vida útil de las membranas.

Optimización del proceso

Se podría mejorar el diseño de las plantas, esto con el fin de facilitar el acceso para el mantenimiento de las membranas, lo cual podría, en primer lugar, disminuir costos de mantenimiento, y, además, aumentar la vida útil de las membranas al poder realizarse un mantenimiento más efectivo de manera más seguida.

8.5.4. Otras mejoras

Para el proceso en general, se podría aplicar la mejora continua, para, de manera sistemática identificar, analizar y mejorar el proceso.

Para esto se podrían implementar sistemas de monitoreo de la calidad y rendimiento de la planta, los consumos, y otros parámetros relevantes. Un análisis constante de estos datos podría identificar posibles mejoras y tendencias en el tiempo.

Capítulo 9

Conclusiones y Recomendaciones

Durante este estudio se pudo realizar la evaluación cuantitativa de los consumos de energía y materiales de las plantas analizadas, permitiendo una comparación respecto a los requerimientos en distintos tamaños, y también en distintas características de agua, en este caso utilizando agua de mar de la región de Valparaíso y de la región de Atacama.

Se pudo observar que, a medida que aumenta el tamaño de la planta, también lo hace el consumo de energía, tanto para la ultrafiltración como para la ósmosis inversa. La relación entre el consumo energético y la producción de agua es directamente proporcional. Además, se observó que algunas características del agua influyen en el consumo energético. En primer lugar, la cantidad de sólidos suspendidos presentes en el agua: cuanto mayor es esta cantidad, mayor es el requerimiento energético de la planta, especialmente en la fase de pretratamiento durante la ultrafiltración. Por otro lado, la temperatura tiene el efecto contrario: al aumentar, disminuye el consumo energético debido a la disminución de la viscosidad del agua y el aumento de la permeabilidad de la membrana.

Es importante notar que, aunque un agua a mayor temperatura tenga un menor consumo energético, lo cual es un beneficio, daña más la membrana, y además produce un agua de menor calidad, ya que deja pasar una mayor cantidad de iones y solutos.

También se pudo observar, con respecto a las membranas, en primer lugar estas están relacionadas de manera proporcionalmente directa con el tamaño de la planta, ya que la membrana es capaz de tratar una cierta cantidad de agua, y cuando el flujo va aumentando se hace necesario tener una mayor cantidad de membranas. Hay otros factores que pueden influir en el consumo de membranas, haciendo que su vida útil sea menor, sin embargo el programa WAVE no entrega la posibilidad

de analizar esto, por lo que solo se puede hacer un análisis teórico, donde se concluye que si la membrana no es limpiada regular y adecuadamente, o si es sometida a altas temperaturas de manera constante, su vida útil irá disminuyendo.

Respecto a los químicos utilizados tanto en el pre-tratamiento como para la limpieza, todos son de gran importancia, en primer lugar para que el proceso sea llevado a cabo de manera adecuada y de la manera más eficiente posible, pero también para cuidar los equipos e implementos, alargando sus vidas útiles, lo cual reduce tanto el costo económico como el impacto ambiental. Todos presentaron un comportamiento directamente proporcional con respecto a la producción de agua.

Los químicos de post-tratamiento varían según el uso que se le vaya a dar al agua, pero en la normativa chilena el agua potable necesita de un post-tratamiento mucho más extenso, por temas de seguridad de las personas, mientras el agua para uso de las mineras o de riego necesita solamente remineralización, y en una menor cantidad que el agua potable, únicamente para contrarrestar su efecto corrosivo, el agua utilizada en minería es la que usa una menor cantidad de químicos, lo cual se puede asociar a su uso en máquinas, que puede resultar menos delicado que la salud humana o la vida de las plantas. Estos químicos son de gran importancia para que el agua pueda realmente ser utilizada en su uso objetivo sin causar problemas o efectos negativos, y tienen un comportamiento directamente proporcional con respecto a la producción de agua.

Los distintos consumos y residuos generados tienen impactos ambientales que ya fueron mencionados, las emisiones asociadas al consumo energético, la descarga con alta salinidad y químicos, y la generación de residuos por las membranas, si bien estos impactos no se pueden evitar, se pueden tomar medidas para disminuirlos, mejorando el proceso poco a poco mediante el uso de energías renovables, recuperadores de energía, cuidado de las membranas, y búsqueda de nuevos métodos para reducir los impactos.

A modo de recomendaciones futuras, sería bueno desarrollar este mismo estudio con un software que permita más detalles, tales como los iones específicos, además de poder realizar el estudio con datos tomados lo más actualmente posible, esto ya que, como fue mencionado, estos datos van cambiando en el tiempo, por lo que sería bueno tener datos lo más actualizados posibles. Además, sería bueno replicar el estudio con distintos datos tomados en un tiempo determinado, para poder observar que tan significativos serían los cambios de las condiciones del agua y su respectivo efecto en las plantas.

Finalmente, como estudios futuros, sería beneficioso realizar un análisis costo-beneficio de los méto-

dos de reducción de impactos en estas distintas plantas. Asimismo, sería útil llevar a cabo estudios ambientales a largo plazo de estas plantas en el ecosistema, considerando su tiempo de vida aproximado de 30 años, que podría prolongarse. Conocer los efectos no solo inmediatos, sino también a largo plazo de las plantas, incluidos los efectos persistentes en el ambiente una vez que la planta ya no esté operativa, sería de gran importancia. Además, sería provechoso realizar un estudio de desarrollo de tecnologías complementarias que incluya posibles mejoras, como membranas con mayor durabilidad, dispositivos de recuperación energética más eficientes y recuperación de químicos de la descarga, entre otras medidas que puedan maximizar la eficiencia y la sostenibilidad del proceso.

En conclusión se puede decir que la ósmosis es una solución viable y sostenible para las necesidades hídricas de las regiones costeras, y que si bien podrían realizarse mejoras al proceso, dentro de las opciones de desalinización está dentro de las con menor impacto y más alcance, sin embargo, aún quedan estudios futuros que podrían cambiar esto.

Referencias

- Aimone Arredondo, G. (2024). Desalación del agua de mar: una alternativa de progreso para Chile. *Revista Marina*.
- Alvarado, R., & de la Vega Planet, F. (2022). *Día Mundial del Agua: Chile lidera la crisis hídrica en América Latina*. <https://forestal.uchile.cl/noticias/184816/dia-mundial-del-agua-chile-lidera-la-crisis-hidrica-en-america-latina>
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2010). 64/292. El derecho humano al agua y el saneamiento. *Asamblea General de las Naciones Unidas*.
- Ayoub, G., Korban, L., Al-Hindi, M., & Zayyat, R. (2019). Scaling of reverse osmosis membranes used in water desalination: Phenomena, impact, and control; future directions. *Water Air Soil Pollut*, 230-238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11270-019-4299-2>
- Behnam, P., Faegh, M., & Khiadani, M. (2022). A review on state-of-the-art applications of data-driven methods in desalination systems. *Desalination*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115744>
- Cabrera, E., & Cárdenas, J. C. (2023). ¿Quiénes son los responsables de las muertes de las últimas ballenas francas australes en la Patagonia chilena? *Centro de Conservación Cetácea*.
- Campione, A., Gurreri, L., Ciofalo, M., Micale, G., Tamburini, A., & Cipollina, A. (2018). Electrodialysis for water desalination: A critical assessment of recent developments on process fundamentals, models and applications. *Desalination*, 434, 121-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.044>
- Carbotecnia. (2024). *¿Qué es la ultrafiltración*. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/que-es-la-ultrafiltracion/>
- Carbotecnia.info. (s.f.). Qué es la ósmosis inversa (purificador).
- Çengel, Y., & Turner, R. (2004). *Fundamentals of Thermal-fluid Sciences*. McGraw-Hill Higher Education.
- Comisión Chilena del Cobre. (2017). “Consumo de agua en la minería del cobre al 2016”. Ministerio de Minería.
- Comisión Chilena del Cobre. (2022a). *Agua en la minería del cobre* (inf. téc.).

- Comisión Chilena del Cobre. (2022b, julio). *INFORME: ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO DE LA ACTIVIDAD MINERA A NIVEL REGIONAL* (inf. téc.). Gobierno de Chile.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Consultoría Estratégica para el Proyecto de la Planta Desaladora para las Ciudades de Guaymas y Empalme, Estado de Sonora*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno de Mexico.
- Comité Científico de Cambio Climático. (2022, diciembre). *Desalinización: Oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile* (inf. téc.). Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC). (2010). *Informe consolidado de la evaluación del estudio de impacto ambiental del proyecto "Planta Desalinizadora Minera Candelaria"*. Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental.
- Contreras-Martínez, J., García-Payo, C., Arribas, P., Rodríguez-Sáez, L., Lejarazu-Larrañaga, A., García-Calvo, E., & Khayet, M. (2021). Recycled reverse osmosis membranes for forward osmosis technology. *Desalination*, 519. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115312>
- COTECNO. (2022). *Tamiz estandar de 8", de diámetro, 1-1/4" (31.5 mm) de malla de acero inoxidable y 1" (25 mm) de media altura*. <https://www.cotecno.cl/tamiz-estandar-de-8-de-diametro-1-1-4-31-5-mm-de-malla-inoxidable-con-marco-de-laton-y-1-25-mm-de-media-altura-2/>
- Curto, D., Franzitta, V., & Guercio, A. (2021). A Review of the Water Desalination Technologies. *Applied Sciences*.
- De Miguel, M. (2016). *Sistemas de captación en desaladoras de agua de mar (I). Tomas abiertas*. <https://www.iagua.es/blogs/mario-miguel-bello/sistemas-captacion-desaladoras-agua-mar>
- Delta Filtration. (2022). *Dow IP-51 IP-77 Alternative*. <https://www.dt-filtri.com/product/Dow-IP-51-IP-77-Alternative-366.html>
- Doornbusch, G., Bel, M., Tedesco, M., Post, J., Borneman, Z., & Nijmeijer, K. (2020). Effect of membrane area and membrane properties in multistage electrodialysis on seawater desalination performance. *Journal of Membrane Science*, 611, 118303. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118303>
- DrinTec. (2018). *Lechos de calcita ascendentes de altura constante para la remineralización de aguas desaladas*. DrinTec.
- Drintec. (2023). *Lechos de calcita en depósitos verticales*. <https://drintec.com/es/productos/lechos-de-calcita-en-depositos-de-prfv-pp/>
- DuPont. (2019). *Introduction to WAVE*. DuPont.

- DuPont. (2020). *FilmTec™ SW30XLE-440 Seco*. <https://www.dupont.com/products/filmtecsw30xle440dry.html>
- DuPont. (2021). *WAVE Design Software*. DuPont.
- DuPont. (2022). *DuPont™ IntegraTec™ P Series PES-UF Modules T-Rack™ y Modules para Open Platform: Manual de proceso y diseño*. DuPont.
- El Mostrador. (2021). Población de ballenas azules, en peligro de extinción, corren serio riesgo en el sur de Chile por intenso tráfico de naves pesqueras. *El Mostrador*.
- Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Olabi, A. (2020). Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of The Total Environment*, 748. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>
- Fundación Aquae. (2021a). *El uso del agua de mar para el saneamiento*. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/agua-mar-para-saneamiento/>
- Fundación Aquae. (2021b). *Métodos de desalinización*. <https://www.fundacionaquae.org/metodos-de-desalinizacion/>
- Global Solar Atlas. (2020). Global solar atlas: United Arab Emirated/Norway. sl. *Global Solar Atlas*.
- Gobierno de Chile; Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2022). *Informe de Gestión del Sector Sanitario 2022* (inf. téc.).
- Guajardo Arriagada, F. (2023). “*Propuesta Técnica y Económica para la Implementación de una Desalinizadora bajo el Contexto de Seguridad Hídrica en el Sector de Quintay Comuna de Casa Blanca, Región de Valparaíso*”. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Iberdrola. (2021). *La desalinización del agua del mar, ¿un método para luchar contra la escasez?* <https://www.iberdrola.com/innovacion/desalinizacion>
- Instituto Nacional de Normalización. (1987). *Norma Chilena NCh 1333: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos*. Instituto Nacional de Normalización.
- Instituto Nacional de Normalización. (2005). *Norma Chilena NCh 409/1: Agua potable - Parte 1 - Requisitos*. Instituto Nacional de Normalización.
- Kadaj, E., & Bosleman, R. (2018). Chapter 11 - Energy Recovery Devices in Membrane Desalination Processes. En *Renewable Energy Powered Desalination Handbook* (pp. 415-444). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815244-7.00011-8>
- Khan, M., Al-Absi, R. S., Khraisheh, M., & Al-Ghouti, M. A. (2021). A better understanding of seawater reverse osmosis brine: Characterizations, uses, and energy requirements. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100165>

- Khanzada, N. K., Al-Juboori, R. A., Khatri, M., Ahmed, F. E., Ibrahim, Y., & Hilal, N. (2024). Sustainability in Membrane Technology: Membrane Recycling and Fabrication Using Recycled Waste. *Membranes*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/membranes14020052>
- Kucera, J. (2010). *Reverse Osmosis: Design, Processes, and Applications for Engineers*. Scrivener.
- Kucera, J. (2019). *Desalination: Water from Water*. Scrivener.
- Kuzma, S., Saccoccia, L., & Chertock, M. (2023). *25 Countries, Housing One-quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress*. <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>
- León-Zerpa, F., Peñate-Suárez, B., Roo-Filgueira, J., & Vaswani, J. (2021). Reutilización de elementos de ósmosis inversa de los procesos de desalación. *Ingeniería y tecnología del medio ambiente*. <https://doi.org/https://doi.org/10.6036/10061>
- Mancilla-Villa, O. R., Bautista-Olivas, A. L., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Reyes-Ortigoza, A. L., Flores-Magdaleno, H., González-Eguiarte, D. R., & Guevara-Gutiérrez, R. D. (2014). Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. *Tecnología y ciencias del agua*, 97-109.
- Matin, A., Rahman, F., Shafi, H. Z., & Zubair, S. M. (2019). Scaling of reverse osmosis membranes used in water desalination: Phenomena, impact, and control; future directions. *Desalination*, 230-238. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:104362686>
- Melgarejo, J., & Fernández-Aracil, P. (2019). Congreso Nacional del Agua Orihuela. Innovación y Sostenibilidad.
- Ministerio de Defensa Nacional. (1978). Decreto de Ley 2222: Sustituye Ley de Navegación. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=6855>
- Ministerio de Defensa Nacional. (1992). Decreto 1: Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=7232&idParte=0>
- Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. (1991). Fija el Texto Refundido, Coordinado y Sistematizado de la Ley N° 18.892, de 1989 y sus Modificaciones, Ley General de Pesca y Acuicultura. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=13315>
- Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción; Subsecretaría de Pesca. (2008). Ley 20293: Protege a los Cetáceos e Introduce Modificaciones a la Ley N° 18.892 General de Pesca y Acuicultura. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=280305>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2017). *Análisis de Riesgo Ecológico por Sustancias Potencialmente Contaminantes en el Aire, Suelo y Agua, en las comunas de Concón, Quintero y Puchuncavi*. Ministerio de Medio Ambiente.
- Ministerio de Obras Públicas. (1981). Código de Aguas [Decreto con Fuerza de Ley N° 1, de 1981]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=5605&idVersion=2024-01-16&idParte=8627947>

- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (1994). Ley de Bases Generales del Medio Ambiente [Ley N° 19.300]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2000). Decreto 90: Establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637>
- Missimer, T., & Maliva, R. (2017). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination*. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>
- Naciones Unidas. (2023). *Desafíos Globales: Agua*. [https://www.un.org/es/global-issues/water#:~:text=2%200000%20millones%20de%20personas,reutilizadas%20\(ONU%20Agua%202018\).](https://www.un.org/es/global-issues/water#:~:text=2%200000%20millones%20de%20personas,reutilizadas%20(ONU%20Agua%202018).)
- Nashed, A., & Van Dang, B. (2022). Chapter 3 - Solar and water: high-technology readiness technologies. En *Solar-Driven Water Treatment* (pp. 67-117). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90991-4.00007-4>
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (2021). *Agua para la agricultura*. <https://www.odepa.gob.cl/sustentabilidad/agricultura-sustentable/agua>
- Okampo, E. J., & Nwulu, N. (2021). Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110712>
- Panagopoulos, A., & Haralambous, K.-J. (2020). Environmental impacts of desalination and brine treatment - Challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111773>
- Panagopoulos, A., Haralambous, K.-J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. *Science of The Total Environment*, 693. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351>
- Pardo Lillo, J. J. (2021). *“Estudio del Impacto Ambiental de Planta Desalinizadora por Osmosis Inversa Mediante el Análisis de Ciclo de Vida”*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- PENTAIR. (2019). *Unidad de ultrafiltración de membrana COMPACT 33V*. <https://www.directindustry.es/prod/pentair-x-flow/product-71363-1122708.html>
- Philippe, R., Dixon, R., & Pozzo, S. (2010). Sal or desal: Seawater supply options for the mining industry. *WIM 2010: Proceedings of the 2nd International Congress on Water Management in the Mining Industry*, 13-20.
- Pure Aqua. (2018). ¿Qué es la ósmosis inversa? %5Curl%7Bhttps://es.pureaqua.com/que-es-la-osmosis-inversa/%7D
- Pure Aqua, Inc. (s.f.). DOW Ultrafiltración SFD-2860.
- Rahimah, I., Siregar, E. S. Y., Heriyanto, T., & Siregar, V. P. (2021). Application of Principal Component Analysis to Characterize The Effect of Fishing Ground of Portunus pelagicus

- in Lancang Island Based on Environmental Parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 695(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/695/1/012020>
- Rosborg, I., Kozisek, F., & Ferrante, M. (2019). Health Effects of De-mineralization of Drinking Water. En *Drinking Water Minerals and Mineral Balance: Importance, Health Significance, Safety Precautions* (pp. 149-160). Springer International Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-18034-8_7
- Saavedra F., A., Valdés R., H., & Zúñiga E., C. *Postratamientos de agua desalada según su utilización, costos de purificación*. Informativo INIA La Cruz. 2022, septiembre. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/68745>
- Salinas-Freire, H., Pérez-Ones, O., & Rodríguez-Muñoz, S. (2021). Estado del arte. Métodos de desalinización de agua. 28, 212-226. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i2.21>
- Schantz, A. B., Xiong, B., Dees, E., Moore, D. R., Yang, X., & Kumar, M. (2018). Emerging investigators series: prospects and challenges for high-pressure reverse osmosis in minimizing concentrated waste streams. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 4, 894-908. <https://doi.org/10.1039/C8EW00137E>
- Senán-Salinas, J., García-Pacheco, R., Landaburu-Aguirre, J., & García-Calvo, E. (2019). Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes: Comparative LCA and cost-effectiveness analysis at pilot scale. *Resources, Conservation and Recycling*, 150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104423>
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2023). *"Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras en el SEIA"*. Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental.
- SGA S.A. Soluciones en Gestión Ambiental. (2017). *Capítulo 3.5: Medio Marino*. Aguas Pacífico.
- SGA S.A. Soluciones en Gestión Ambiental. (2019). *Sección 3.4.2. Línea de Base: Ecosistemas Marinos, Oceanografía Química*. Proyecto Atacama Sur.
- Sola, I., Sánchez-Lizaso, J. L., Muñoz, E., Pamela T. and García-Bartolomei, Sáez, C. A., & Zarzo, D. (2019). Assessment of the Requirements within the Environmental Monitoring Plans Used to Evaluate the Environmental Impacts of Desalination Plants in Chile. *water*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w11102085>
- Soliman, M. N., Guen, F. Z., Ahmed, S. A., Saleem, H., Junaid Khalil, M., & Javaid Zaidi, S. (2021). Energy consumption and environmental impact assessment of desalination plants and brine disposal strategies. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 589-608.
- Solís-Carvajal, C., Vélez, C., & Ramírez-Navas, J. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre ciencia e ingeniería*.
- Subsecretaría de Redes Asistenciales, División de Control y Prevención de Enfermedades, Departamento de Salud Bucal. (2022). *"INFORME NACIONAL DE FLÚOR EN AGUA POTABLE POR REGIONES"*. Ministerio de Salud.

- Sulzer. (2017). Applications - Seawater lift.
- Swistock, B. (2021). *Interpretación de los análisis del agua de riego*. <https://extension.psu.edu/interpretacion-de-los-analisis-del-agua-de-riego#:~:text=y%20plantas%20fotosint%C3%A9ticas-,Dureza,el%20crecimiento%20de%20las%20plantas>.
- Voutchkov, N. (2013). *Desalination Engineering: Planning and Design*. McGraw-Hill.
- Wang, L. K., Chen, J. P., Hung, Y.-T., & Shammas, N. K. (2011). *Membrane and Desalination Technologies*. Humana Press.
- Water Projects Engineering & Construction. (2020). *Cómo leer la proyección de funcionamiento de un equipo de ósmosis inversa (caso Hydranautics) - Parte II*. <https://www.waterprojects-ec.com/como-leer-la-proyeccion-de-funcionamiento-de-un-equipo-de-osmosis-inversa-caso-hydranautics-parte-ii-c4a5b927>
- Yu, H., Chang, H., Li, X., Zhou, Z., Song, W., Ji, H., & Liang, H. (2021). Long-term fouling evolution of polyvinyl chloride ultrafiltration membranes in a hybrid short-length sedimentation/ultrafiltration process for drinking water production. *Journal of Membrane Science*, 630. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119320>
- Zarzo, D., & Prats, D. (2018). Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future? *Desalination*, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.046>
- Zúñiga E., C., Valdés R., H., & Saavedra F., A. *Manual técnico de desalación y purificación de aguas mediante osmosis inversa*. Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 2022. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/68622>

Capítulo 10

Anexo

10.1. Tabla Valores de Energía en Ultrafiltración

Tabla 10.1: *Valores de Energía Ultrafiltración. Elaboración propia.*

Agua producida[L/s]	Energía Atacama[kwh]	Energía Valparaíso[kwh]
1	0,00007	0,00009
10	0,0006	0,0008
100	0,006	0,008
1000	0,07	0,08
10000	0,6	0,8

10.2. Tabla Valores de Energía en Ósmosis Inversa

Tabla 10.2: *Valores de Energía Ósmosis inversa. Elaboración propia.*

Agua producida[L/s]	Energía Atacama[kwh]	Energía Valparaíso[kwh]
1	0,00414	0,00432
10	0,0464	0,0491
100	0,464	0,491
1000	4,64	4,91
10000	46,4	49,1

10.3. Tabla Valores Cambio de Membranas

Tabla 10.3: *Membranas necesarias a lo largo de la vida de la planta. Elaboración propia.*

	Caso 1				Caso 2			
	Atacama		Valparaíso		Atacama		Valparaíso	
Agua producida [L/s]	UF	OI	UF	OI	UF	OI	UF	OI
1	24	20	24	20	120	60	120	60
10	192	160	240	160	960	480	1200	480
100	1944	1600	2268	1600	9720	4800	11340	4800
1000	19440	16000	23760	16000	97200	48000	118800	48000
10000	198000	160000	198000	160000	990000	480000	990000	480000

10.4. Tablas Dosis Químicos en el Pre-tratamiento

10.4.1. Dosis mensual de Ácido Sulfúrico

Tabla 10.4: *Dosis mensual de H_2SO_4 . Elaboración propia*

$H_2SO_4(98\%)$		
	Atacama	Valparaíso
Agua producida [L/s]	Dosis mensual[L]	Dosis mensual[L]
1	0,85	1,19
10	8,56	11,98
100	85,71	119,99
1000	856,78	1199,49
10000	8568,03	11995,24

10.4.2. Dosis mensual de Hipoclorito de Sodio

Tabla 10.5: *Dosis mensual de $NaOCl$. Elaboración propia.*

$NaOCl(12\%)$	
Agua producida [L/s]	Dosis mensual[L]
1	0,32
10	3,24
100	32,44
1000	324,31
10000	3243,14

10.4.3. Dosis mensual de Metabisulfito de Sodio

Tabla 10.6: *Dosis mensual de $Na_2S_2O_5$. Elaboración propia.*

$Na_2S_2O_5$ (100 %)	
Agua producida [L/s]	Dosis mensual [L]
1	2,89
10	29,16
100	291,99
1000	2918,76
10000	29188,24

10.4.4. Dosis mensual de Hexametafosfato de Sodio

Tabla 10.7: *Dosis mensual de $Na_6P_6O_{18}$. Elaboración propia.*

$Na_6P_6O_{18}$ (100 %)	
Agua producida [L/s]	Dosis mensual [L]
1	10,37
10	104,62
100	1047,64
1000	10472,15
10000	104723,87

10.5. Tablas Dosis Químicos para Limpieza de Membranas

10.5.1. Clean in Place (CIP)

Ácido Cítrico

Tabla 10.8: *Dosis anual de ácido cítrico. Elaboración propia.*

Acido Cítrico(100 %)	
Agua producida [L/s]	Caudal anual[L]
1	0,29
10	2,89
100	28,93
1000	289,14
10000	2891,47

Ácido Clorhídrico

Tabla 10.9: *Dosis anual de ácido clorhídrico. Elaboración propia.*

HCl-CIP(32 %)		
	Atacama	Valparaíso
Agua producida [L/s]	Caudal anual[L]	Caudal anual[m³]
1	3.285	3.176
10	33.150	32.049
100	331.944	320.922
1000	3318.096	3207.925
10000	33181.706	32079.970

Hipoclorito de Sodio

Tabla 10.10: *Dosis anual de hipoclorito de sodio. Elaboración propia.*

NaOCl-CIP(12 %)	
Agua producida [L/s]	Caudal anual[L]
1	5,14
10	51,84
100	519,10
1000	5188,90
10000	51890,21

Hidróxido de Sodio

Tabla 10.11: *Dosis anual de NaOH. Elaboración propia.*

NaOH(50 %)		
	Atacama	Valparaíso
Agua producida [L/s]	Caudal anual [L]	Caudal anual [L]
1	2,27	1,51
10	22,91	15,25
100	229,38	152,73
1000	2292,83	1397,11
10000	22928,83	15267,11

10.5.2. Chemically Enhanced Backwashing (CEB)

Ácido Clorhídrico

Tabla 10.12: *Dosis mensual de HCl. Elaboración propia.*

HCl-CEB(32 %)		
	Atacama	Valparaíso
Agua producida [L/s]	Caudal mensual [L]	Caudal mensual [L]
1	13.69	13.23
10	138.12	133.54
100	1383.10	1337.18
1000	13825.40	13366.35
10000	138257.11	133666.54

Hipoclorito de Sodio

Tabla 10.13: *Dosis mensual de NaOCl. Elaboración propia.*

NaOCl-CEB(12 %)	
Agua producida [L/s]	Caudal mensual [L]
1	3,75
10	37,80
100	378,51
1000	3783,58
10000	37836,61

10.6. Tablas Dosis Químicos para Acondicionamiento

10.6.1. Acondicionamiento del Agua para Consumo Humano

Tabla 10.14: *Químicos necesarios diariamente para potabilizar el agua. Elaboración propia.*

Agua producida[L/s]	CaCO₃ [kg]	CO₂ [kg]	MgSO₄ · 7H₂O [kg]	NaOCl [kg]	NaF [kg]
<i>1</i>	5,79	2,55	3.74	0,10	0,07
<i>10</i>	57,89	25,47	37.40	0,95	0,69
<i>100</i>	578,88	254,71	374.02	9,50	6,91
<i>1000</i>	5788,80	2547,07	3740.17	95,04	69,12
<i>10000</i>	57888,00	25470,72	37401.70	950,40	691,20

10.6.2. Acondicionamiento del Agua para Minería

Tabla 10.15: *Químicos necesarios diariamente para acondicionar el agua para su uso en minería. Elaboración propia.*

Agua producida[L/s]	CaCO₃ [kg]	CO₂ [kg]
<i>1</i>	4,92	2,17
<i>10</i>	49,25	21,67
<i>100</i>	492,48	216,69
<i>1000</i>	4924,80	2166,91
<i>10000</i>	49248,00	21669,12

10.6.3. Acondicionamiento del Agua para Agricultura

Tabla 10.16: *Químicos necesarios diariamente para acondicionar el agua de riego. Elaboración propia.*

Agua producida[L/s]	$CaCO_3$ [kg]	CO_2 [kg]
1	8,81	3,88
10	88,13	38,78
100	881,28	387,76
1000	8812,80	3877,63
10000	88128,00	38776,32