

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**IMPACTOS AMBIENTALES EN LA DESALACIÓN DEL AGUA
DE MAR Y PROPUESTA DE REUTILIZACIÓN DE
MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA PARA LA
PRODUCCIÓN DE AGUA ULTRAPURA EN LA PRODUCCIÓN
DE HIDRÓGENO VERDE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

CÉSAR ENRIQUE VALDÉS SOTO

PROFESORA GUÍA

MARÍA PILAR GÁRATE CHATEAU

PROFESOR CORREFERENTE

PEDRO FERNÁNDEZ DE LA REGUERA BASTIDAS

SANTIAGO, 17 DE JULIO, 2023

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a mi madre Susana y mi hermano Santiago, quienes han sido mis grandes pilares a lo largo de toda mi vida y quienes me ayudaron a no rendirme en aquellos momentos difíciles de la universidad en que decidí cambiarme de carrera y optar por este camino, el cual fue lo más correcto para mí. A pesar todos los problemas que hemos pasado, siempre supimos estar el uno para el otro y salir adelante. Espero que el haber llegado a este punto también sea una motivación para mi hermano ya que sigue mis pasos estudiando ingeniería y sé que también tendrá muchos desafíos, lo importante es no rendirse. También dedico este trabajo a mi padre Sergio, que, aunque ya no sigue cerca de nosotros cumplió con su rol y me dio las herramientas necesarias para alcanzar mis metas.

Este trabajo de igual manera va dedicado a mis familiares de Argentina, aquellos que siempre me animan y se preocupan por mí con mensajes, videollamadas, palabras de aliento y que me han recibido de la mejor manera cuando voy de visita. También lo dedico a Vanessa y Marco quienes nos brindaron espacio de su hogar y apoyo para vivir hasta poder progresar.

Una parte importante de la vida en general son las amistades y lazos que se forman en el camino, por lo que le dedico este trabajo a mis mejores amigos, Kevin, Carlos, Nicolás, Alejandro, Marcelo, Francisca P., María y Danae, quienes me acompañan desde el colegio, a Macarena y Maximiliano a quienes tuve la gran suerte de conocer en la USM y formar una amistad más allá de lo académico, a Laura la amiga que vive más lejos pero que ha estado durante todo mi proceso y a mi polola Francisca C. quien llegó a mi vida en la etapa final de mi carrera, me ha acompañado en unos de los procesos más difíciles y me demostró que la vida sorprende de la mejor manera cuando menos te lo esperas.

Finalmente, quiero agradecer a mi profesora guía María G. por sus consejos, paciencia, preocupación y por su apoyo durante el desarrollo de la memoria, y a mi profesor correferente Pedro F. con quien he tenido agradables e interesantes charlas cada vez que hacíamos una reunión para la revisión de las ayudantías de econometría.

ÍNDICE

I. RESUMEN	5
II. ABSTRACT.....	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Problema de investigación	9
1.2. Objetivo General.....	11
1.3. Objetivos Específicos.....	11
2. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. Antecedentes	12
2.1.1. Situación mundial de la producción de hidrógeno.....	12
2.1.2. Escenario chileno en la producción de hidrógeno verde	13
2.1.3. Demanda y aplicaciones del hidrógeno en Chile	16
2.1.4. Regulaciones ambientales asociadas a la producción de hidrógeno verde	17
2.1.5. Regulaciones asociadas a la producción de agua desalinizada en Chile	19
2.2. Propiedades, características y clasificaciones del hidrógeno.....	21
2.3. Características del agua de mar en el océano pacífico.....	23
2.4. Producción de hidrógeno	24
2.4.1. Electrólisis.....	27
2.5. Procesos de desalinización del agua de mar	30
2.5.1. Osmosis Inversa	33
2.6. Proceso industrial de la Osmosis Inversa.....	34
2.7. Ecuaciones asociadas a la Osmosis Inversa	35
2.7.1. Coeficiente de permeabilidad de la membrana (A)	35
2.7.2. Factor de recuperación (Y)	35
2.7.3. Factor de rechazo de sales (R) y paso de sales (Ps).....	36
2.7.4. Concentración de permeado (Cp) y concentración de rechazo (Cr)	36
2.8. Tipos de membranas de osmosis inversa	37
2.8.1. Membranas Asimétricas.....	37
2.8.2. Membranas de capa fina (TFC)	38
2.9. Impactos ambientales en la producción de hidrógeno verde	39
2.9.1. Desechos de salmuera	39
2.9.2. Desechos de membranas de ósmosis inversa.....	43
2.10. Antecedentes internacionales ligados a la producción de hidrógeno verde.....	43

2.10.1. Utilización y tratamiento de residuos	44
2.10.1.1. Tratamientos de membranas	44
2.10.1.2. Tratamientos y reutilización de agua de rechazo	48
3. ANÁLISIS Y DESARROLLO	50
3.1. Plantas de hidrógeno verde: modelos, sistemas de desalinización y membranas..	50
3.1.1. Plantas de hidrógeno verde	51
3.1.2. Modelos de membranas del mercado.....	56
3.1.3. Reutilización de membranas de ósmosis inversa y sus materiales	60
3.1.3.1. Autopsias de membranas de ósmosis inversa	60
3.1.3.2. Lavado de membranas	66
3.2. Economía circular de las membranas de OI	70
3.2.1. Gestión del final de la vida útil de las membranas de OI	71
3.2.2. Transformación de membranas	78
3.2.3. Equipos y costos de la reutilización de membranas y sus materiales.	89
3.3. Propuesta de reutilización y análisis financiero	96
3.3.1. Análisis Financiero	101
3.3.1.1. Resultados de flujo de caja	102
4. CONCLUSIONES	106
5. REFERENCIAS	110

I. RESUMEN

A través del tiempo se ha hecho cada vez más importante la búsqueda de nuevas fuentes de agua potable para el consumo humano, agricultura, ganadería e industria. Hoy en día este recurso es sumamente necesario para la producción de hidrógeno verde, y una de las alternativas más utilizadas y prometedoras de obtención es la desalinización del agua de mar mediante el uso de membranas de osmosis inversa.

Este trabajo pretende dar a conocer los principales efectos de la desalinización de agua de mar y evaluar las formas de reutilizar las membranas de ósmosis inversa (OI) al final de su vida útil mediante métodos oxidativos, para convertirlas en membranas de nanofiltración (NF) y ultrafiltración (UF) que sirvan en los procesos de pretratamientos del agua marina, con el fin de generar una economía circular.

Para ello se revisan estudios internacionales, de los cuales se obtiene información sobre distintos métodos de reciclaje y costos de referencia que permiten evaluar la posibilidad de integrar una planta de transformación de membranas en una planta desalinizadora, comparando los costos de comprar membranas de NF nuevas con vida útil promedio de 5 años, versus los costos asociados a la inversión, mantención y uso de membranas transformadas con vida útil promedio de 2 años, en un horizonte de evaluación de 25 años.

Entre los principales hallazgos se encuentra que las membranas pueden separarse en sus componentes para ser recicladas creando materiales termoestables, plásticos de botellas, geotextiles, entre otros, y las membranas de OI pueden ser degradadas mediante la adición de cloro libre con concentraciones entre 33.000 y 46.000 ppm-h para obtener membranas de NF y 350.000 ppm-h para membranas de UF sin un límite claro entre estos tipos de membranas puesto que la retención de sales se encuentra en el rango de NF y la permeabilidad en el rango de UF. Por otra

parte, es posible implementar una planta de transformación de membranas que aporte a la economía circular, siempre y cuando la planta desalinizadora o de hidrógeno verde utilice una gran cantidad de membranas, en este caso de estudio sobre 800 membranas de NF aproximadamente, ya que se debe considerar costos asociados a las autopsias de membranas, equipos, herramientas, químicos, mantención y reemplazo al final de su vida útil, los que en conjunto deben ser menores al gasto e impacto que genera la compra de membranas nuevas.

Finalmente, se recomienda ampliamente continuar con este tipo investigaciones, enfocadas principalmente al desarrollo de tecnologías que permitan la recuperación de membranas desechadas y una aplicación rentable a menor escala, así como también la búsqueda de nuevas oportunidades de negocio a partir de la economía circular, puesto que Chile tiene un gran potencial para el uso de energías renovables y que la industria del hidrógeno verde se encuentra en fases de desarrollo.

Palabras Clave: Hidrógeno, Electrólisis, Ósmosis Inversa, Membranas, Desalinización, Autopsia, Economía Circular.

II. ABSTRACT

Over time, the search for new sources of drinking water for human consumption, agriculture, livestock and industry has become increasingly important. Nowadays this resource is extremely necessary for the production of green hydrogen, and one of the most used and promising alternatives to obtain it is the desalination of seawater through the use of reverse osmosis membranes.

This work intends to present the main effects of seawater desalination and to evaluate the ways of reusing reverse osmosis (RO) membranes at the end of their useful life by oxidative methods, to convert them into nanofiltration (NF) and ultrafiltration (UF) membranes to be used in seawater pretreatment processes, in order to generate a circular economy.

For this purpose, international studies are reviewed, from which information is obtained on different recycling methods and reference costs that allow evaluating the possibility of integrating a membrane transformation plant in a desalination plant, comparing the costs of purchasing new NF membranes with an average useful life of 5 years, versus the costs associated with the investment, maintenance and use of transformed membranes with an average useful life of 2 years, in an evaluation horizon of 25 years.

Among the main findings is that membranes can be separated into their components to be recycled by creating thermosetting materials, bottle plastics, geotextiles, among others, and RO membranes can be degraded by adding free chlorine with concentrations between 33.000 and 46,000 ppm-h to obtain NF membranes and 350,000 ppm-h for UF membranes without a clear limit between these types of membranes since salt retention is in the NF range and permeability in the UF range. On the other hand, it is possible to implement a membrane transformation plant that contributes to the circular economy, as long as the desalination or green hydrogen plant uses a

large amount of membranes, in this case study about 800 NF membranes approximately, since costs associated with membrane autopsies, equipment, tools, chemicals, maintenance and replacement at the end of their useful life should be considered, which together should be lower than the expense and impact generated by the purchase of new membranes.

Finally, it is highly recommended to continue with this type of research, focused mainly on the development of technologies that allow the recovery of discarded membranes and a profitable application on a smaller scale, as well as the search for new business opportunities based on the circular economy, since Chile has a great potential for the use of renewable energies and the green hydrogen industry is in the development stages.

Keywords: Hydrogen, Electrolysis, Reverse Osmosis, Membranes, Desalination, Autopsy, Circular Economy.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación

Actualmente se encuentra en desarrollo el uso de Hidrógeno Verde como un nuevo combustible para avanzar en la transición energética que permita la descarbonización a nivel mundial. “Este término hace referencia al H₂ producido a partir de fuentes renovables y libres de carbono” (Ladislao, 2020, p.2).

Chile tiene la capacidad de producir hidrógeno renovable muy económico debido a los bajos costos de producción de electricidad renovable, lo que posiciona al país como un productor y potencialmente lo puede transformar en un exportador de hidrógeno a ser considerado en los mercados relacionados con el suministro de hidrógeno renovable (Fúnez, Reyes-Bozo, 2019, p.34).

Otra peculiaridad del país es que el potencial solar en la zona norte y central es del orden de 1700 GW, mientras que en la zona centro y sur del país el potencial hidroeléctrico y eólico alcanza unos 45 GW (Reyes-Bozo, 2020).

Por lo general, el hidrógeno verde se obtiene a partir de la descomposición de las moléculas de agua mediante un proceso electroquímico llamado electrólisis que consiste en someter a las moléculas de agua a un campo eléctrico externo mayor que el campo eléctrico interno de la molécula, logrando que esta se separe obteniendo hidrógeno y oxígeno. (Ladislao, 2020).

Dado que la cantidad de agua salada en nuestro planeta es mucho mayor en comparación al agua dulce, se utilizan diversos métodos que permiten purificar el agua de mar, en este sentido, Duarte (2014) expone que, para realizar el proceso electroquímico el elemento soluble tiene que ser lo más puro posible, es decir, el agua de mar debe pasar por un proceso de purificación haciendo necesario utilizar un sistema de osmosis inversa, el cual realiza la desmineralización del agua.

Al realizar cada proceso de osmosis inversa las membranas utilizadas se van desgastando, tal como indica Gutiérrez, “Una vez que las membranas se acercan al término de su ciclo de vida, los parámetros de operación se deterioran notablemente. Específicamente nos referimos al “diferencial de presión”, al “Rechazo de sales” y al “Flujo”” (2009, p.35) y finalmente son desechadas al igual que el agua de rechazo o también llamada salmuera que corresponde al agua restante con una alta concentración de sal que es vertida al mar.

Las aguas residuales resultantes de la desalinización tienen un contenido mayor en sales que las aguas de origen, presentan diferencias de temperatura, de pH, de alcalinidad y contienen sustancias químicas utilizadas durante el proceso de depuración (Gacía, Ballesteros, 2001, p.2). En este sentido, según lo expuesto por Chesher (1975) en su estudio del impacto biológico del vertido de una planta desalinizadora en Key West (Florida), describe la desaparición de las comunidades originales y la sustitución de estas por pocos organismos característicos de 9 situaciones de estrés (poliquetos serpúlidos, sabélidos y el crustáceo balano) en las zonas más afectadas por el vertido (Gacía, Ballesteros, 2001, p.8).

En base a lo descrito, se pretende encontrar soluciones actuales de reutilización orientadas a disminuir los efectos de contaminación ambiental, que afecta tanto a la flora y fauna marina, como a los seres humanos debido a las cantidades de desechos que se acumulan en vertederos y la relación existente con el ecosistema. En este sentido, se busca dar un énfasis en la zona norte de Chile por su alta capacidad de producción de hidrógeno verde impulsada por el potencial de energía solar.

Lo mencionado lleva a las siguientes preguntas, ¿Es posible reutilizar las membranas de osmosis inversa en procesos similares o en la creación de nuevos productos a partir de sus materiales?, ¿El uso alternativo de las membranas industriales es económicamente viable?

1.2. Objetivo General

Establecer una propuesta de reutilización de las membranas de osmosis inversa, estudiando la implementación en distintos sectores industriales para lograr un proceso de producción de hidrógeno verde a partir de electrólisis de agua más sustentable que ayude a disminuir el impacto ambiental.

1.3. Objetivos Específicos

Identificar las características y composición de las membranas utilizadas en el proceso de osmosis inversa, con el fin de generar una base teórica de datos a partir de investigaciones y fichas técnicas presentes en la literatura.

Conocer los principales componentes del agua de mar que son retenidos por las membranas de osmosis inversa con el fin de determinar la composición y grado de salinidad.

Realizar una revisión internacional de prácticas en desalinización de agua, enfocándose en la identificación de contaminantes y los impactos ambientales, así como en las estrategias adoptadas para fomentar la sustentabilidad en la gestión de residuos, incluyendo las membranas de ósmosis inversa y las prácticas relacionadas con la economía circular.

Evaluar la viabilidad e implicaciones de reutilizar los materiales de membranas de ósmosis inversa desechadas en la construcción de productos alternativos o el uso de la estructura completa en procesos de pretratamiento.

Analizar la factibilidad técnica y económica de la propuesta de reutilización de las membranas de osmosis inversa desechadas en el proceso de desalinización, con énfasis en las tendencias y comportamientos de la producción de hidrógeno verde.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Situación mundial de la producción de hidrógeno

Entre los grandes desafíos de la actualidad se encuentra frenar el aumento de las temperaturas globales, las cuales ya están 1 grado centígrado por encima de los niveles preindustriales y, según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), con solo elevarse otro 0.5 C los efectos podrían ser devastadores (Smink, 2021).

Para lograr este objetivo, se requiere reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 50% al año 2030 y avanzar hacia la carbono-neutralidad para el año 2050 (Masson-Delmotte et al., 2018, p.1-9).

Una de las soluciones que están desarrollando los países es producir hidrógeno verde con el fin de satisfacer las necesidades energéticas sin dañar el medio ambiente, sin embargo, según la Agencia Internacional de Energía actualmente el 99% del hidrógeno usado como combustible se produce a partir de fuentes no renovables y menos del 0,1% se produce a partir de electrólisis del agua (Smink, 2021).

Según lo expuesto por la Agencia Internacional de la Energía (AIE) (2021), en la revisión global de hidrógeno durante el año 2019 solo Francia, Japón y Corea tenían estrategias para el uso del hidrógeno, un número que aumentó a 17 gobiernos al año 2021 con el fin de buscar un sistema energético de cero emisiones netas. También se expresa en dicho documento que la demanda de hidrógeno se situó en 90 Mt en 2020 utilizadas en refinación y aplicaciones industriales y que fue producida casi exclusivamente a partir fuentes fósiles, resultando una emisión de 900 Mt de CO₂. Por otra parte, se duplicó la capacidad global para la producción de hidrógeno a partir de

electricidad (hidrógeno verde), llegando a un poco más de 300 MW a mediados del 2021.

En relación con la capacidad de electrolizadores, Europa es el líder con el 40% de la capacidad instalada mundial, mientras que Australia tiene planes para alcanzar a Europa en unos pocos años; en el caso de América Latina y Medio Oriente se espera un despliegue de altas cantidades de capacidad. En cuanto a China, esta tuvo un comienzo lento pero sus anuncios de proyectos están creciendo rápidamente, y Estados Unidos ha intensificado sus ambiciones mediante el anuncio de la iniciativa Hydrogen Earthshot, que busca reducir el costo del hidrógeno verde (Agencia Internacional de la Energía (AIE), 2021).

Tomando en consideración los datos presentados, es necesario conocer cómo se lleva a cabo la producción de hidrógeno a nivel nacional y cuáles son las expectativas de crecimiento, puesto que, según lo planteado por el Ministerio de Energía en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, “Chile se ha comprometido con la acción climática de manera decidida y ambiciosa. Durante el 2020 actualizó su Contribución Determinada a Nivel Nacional y se comprometió a ser carbono-neutral al 2050, siendo el único país en vías de desarrollo en hacerlo y uno de los pocos del mundo en comenzar a tramitar una Ley Marco de Cambio Climático” (Gobierno de Chile, 2020, p.6).

2.1.2. Escenario chileno en la producción de hidrógeno verde

Al igual que el litio, el hidrógeno ha comenzado a estructurar progresivamente la política energética chilena. A diferencia del mercado tradicional de la energía fósil, estos nuevos insumos aparecen como recursos claves en el proceso global de transición energética y en los escenarios geopolíticos futuros, lo que permitiría a Chile pasar de una posición dependiente y subordinada a una estratégica (Barandarian, 2018).

Chile ha sido identificado como uno de los países capaces de producir el hidrógeno verde

más económico, esto debido al costo nivelado de su producción mediante energía solar fotovoltaica y eólica en los sitios con mayor potencial de este tipo de energía, como son Atacama y la Patagonia, respectivamente (Fasihi y Breyer, 2020; McKinsey & Company, 2020).

En el ámbito de las energías renovables según lo expuesto en la estrategia nacional de hidrógeno verde, se cuenta con más de 509 GW de energía por concentración solar de potencia, 1.180 GW por energía solar fotovoltaica, 191 GW por energía eólica on-shore y 6 GW producidos por energía hidroeléctrica, lo que en total suma más de 1.800 GW de potencial energético renovable que equivalen a 70 veces la demanda en Chile. (Gobierno de Chile, 2020, p.10).

Según los datos entregados por McKensey & Company (2020), dada la alta concentración de energía solar disponible en el Norte del país en conjunto a las economías de escalas existentes, se espera que la producción de electricidad hacia el año 2050 posea un costo nivelado menor que la producción en el centro y sur, lo que generaría a su vez un decrecimiento en el costo nivelado de hidrógeno verde, como se aprecia en la Figura 1.

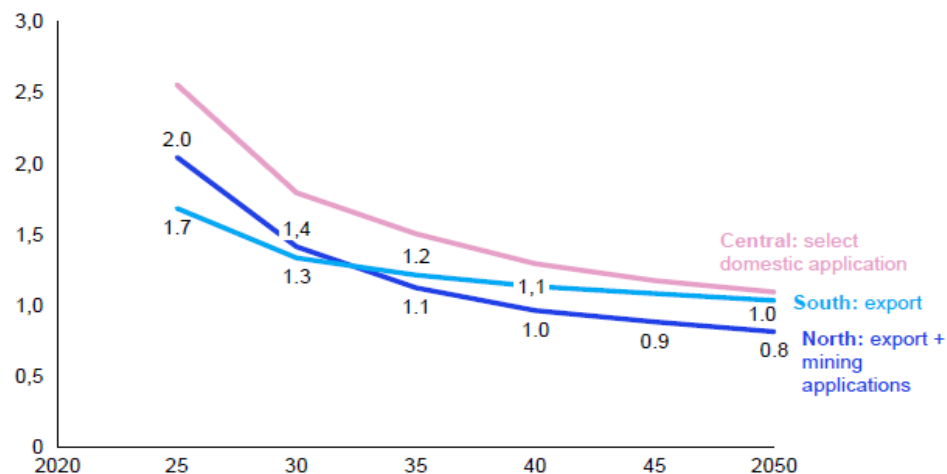


Figura 1: Costo nivelado de hidrógeno verde (USD/kg H₂) de 2020 a 2050. **Nota.** El gráfico representa una proyección de la evolución de los costos asociados a la producción de hidrógeno verde producto de la disminución en los costos esperados de energías renovables. **Fuente:** McKensey & Company, 2020.

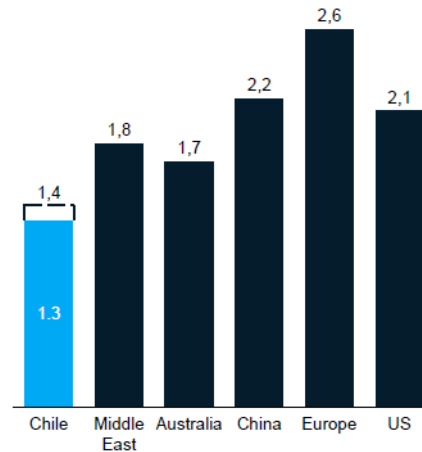


Figura 2: Comparación de costos de producción al año 2030 (USD/kg H₂). **Nota.** El gráfico de barras representa la comparación de los costos de producción de electrolizadores y generación de hidrógeno verde para el año 2030, en donde Chile presenta el escenario más favorable sin considerar los costos de compresión, transporte y distribución. **Fuente:** McKensey & Company, 2020.

Respecto de las Figuras 1 y 2, se puede evidenciar mediante el planteamiento del Ministerio de Energía que:

El hidrógeno verde producido en el Desierto de Atacama y en la Región de Magallanes tendría el costo nivelado de producción más bajo del mundo al 2030. La calidad de los recursos renovables de esas zonas habilitará una producción competitiva a gran escala (Gobierno de Chile, 2020, p.11).

Luego de revisar los datos respecto del escenario y proyección de la producción chilena, es conveniente comprender cuáles son las principales demandas y aplicaciones del hidrógeno verde dentro de la industria, con el fin de entender la gran importancia y la atención que se le ha dado en los últimos años.

2.1.3. Demanda y aplicaciones del hidrógeno en Chile

En la publicación de las Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile (2018), se mencionan algunas de las principales razones para fomentar el estudio, análisis e implementación de tecnologías para producir hidrógeno:

- **Seguridad energética y económica:** La economía chilena depende principalmente de la extracción de materias primas, exportación de productos animales y combustibles que provienen en su mayoría de otros países. Por esta razón, es necesario aprovechar la abundancia de recursos naturales para aumentar la producción local de hidrógeno dado que puede ser almacenado por un largo tiempo y luego convertido en energía, ayudando a la estabilización económica y generando una independencia en términos de precios de diésel y gas.
- **Recurso importante en el mercado energético mundial:** El hidrógeno es uno de los insumos fundamentales en la industria química y su diversificación en aplicaciones provocará que su obtención por métodos renovables lo convierta en uno de los recursos más importantes del mercado energético mundial. Por lo tanto, es necesario desarrollar nuevos métodos económicamente competitivos en Chile.
- **Mejora del medio ambiente:** Se espera un alto crecimiento de las emisiones por gases de efecto invernadero al año 2030. (MAPS Chile, 2014). Por esta razón, es importante el uso de hidrógeno verde ya que permite reducir las emisiones de carbono.
- **Aprovechamiento de fuentes de energías renovables:** Chile es privilegiado en ámbitos de energías renovables, lo que permite producir hidrógeno verde evitando el uso de combustibles fósiles. El norte del país se destaca por los recursos solares, mientras que el sur cuenta con recursos eólicos e hídricos.

- **Desarrollo laboral:** La transformación tecnológica aportará nuevas oportunidades de empleos que contribuirá al desarrollo del capital humano.

En cuanto a las aplicaciones del hidrógeno, las principales son su uso convencional (refinería de petróleo, producción de amoníaco, producción de metanol, elaboración de alimentos, producción de metales y producción de vidrio), almacenamiento energético para el sector de transporte (liviano y pesado), uso estacionario (grandes consumidores, sistema eléctrico, almacenamiento y sistemas de respaldos), uso móvil (baterías portátiles) o directo a través de redes de gas. (Vásquez, R., et al., 2018, p.28).

2.1.4. Regulaciones ambientales asociadas a la producción de hidrógeno verde

En la publicación de Vásquez, R., Salinas, F. y GIZ (2019), se menciona que “En Chile todavía no existen normas específicas al hidrógeno, pero sí para el manejo de gases industriales. Generalmente, las compañías se guían por estándares internos y/o internacionales”. A continuación, se presentan las normas y decretos chilenos en relación con el hidrógeno que involucran la identificación de los gases y el transporte:

- NCh1377.Of1990 Gases comprimidos - Cilindros de gas para uso industrial – Marcas para identificación del contenido y de los riesgos inherentes.
- NCh1025.Of1990 Gases comprimidos - Cilindros de gas para uso médico y para esterilización - Marcas de identificación del contenido y de los riesgos inherentes.
- DS N°280, de 2009, del Ministerio de Economía, Reglamento de Seguridad del Transporte y Distribución de Gas de Red.

La Ley N° 21.305 sobre Eficiencia Energética, publicada el 13 de febrero de 2021, introduce modificaciones al Decreto Ley N°2.224, de 1978, del Ministerio de Minería y al Decreto con fuerza de Ley N°1, de 1978 del Ministerio de Minería con la finalidad de incorporar al

hidrógeno y a los combustibles obtenidos de él como parte del sector de energía, estableciendo normas que regulen las temáticas asociadas a la seguridad de las instalaciones de hidrógeno (Ministerio de Energía, 2022). Según lo dispuesto en la página web de H2 Chile (s.f.), en esta Ley se define al hidrógeno como un combustible, permitiendo que el Ministerio de Energía regule su utilización y, además se incluyen beneficios tributarios para automóviles “cero emisiones”, entre los que se incluyen los automóviles de hidrógeno. Además, se nombran algunos reglamentos aplicables al uso de hidrógeno:

- Decreto 66/2007: Reglamento de instalaciones y medidores de gas
- Decreto 43/2016: reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas (Ministerio de Salud)

La regulación en Chile respecto al hidrógeno verde está en una etapa inicial en cuanto a su operación, generación y distribución, aunque cuenta con un apoyo de alto valor estratégico para el país, el cual se encuentra declarado políticamente en documentos como la política nacional del Ejecutivo sobre H2 Verde y la propuesta por el Congreso a través de la Comisión de Desafíos del Futuro del Senado (BCN, 2022).

El 31 de mayo de 2022, se ejecuta el acuerdo de consejo N°3.121, que crea el “Comité de desarrollo de la industria de hidrógeno verde” y fija normas que regularán su funcionamiento; y aprueba su reglamento, de tal forma que se acelere el desarrollo sostenible de la industria de hidrógeno verde y sus derivados en Chile (BCN, 2023).

2.1.5. Regulaciones asociadas a la producción de agua desalinizada en Chile

En Chile, se estima que diariamente se desalinizan 500 mil toneladas de agua, lo que sitúa al país como “líder” en Latinoamérica en estos procesos. Se está impulsando la desalinización del agua de mar tanto para su utilización en la minería como para su utilización por municipalidades y pequeñas comunidades. Las proyecciones indican que la región de Antofagasta se abastecería en un 100% de agua potable obtenida de plantas desaladoras y que este tipo de iniciativas seguirán avanzando entre las regiones de Arica y Valparaíso (Soto, E. y Ramírez, H., 2022).

A pesar de que la incorporación de particulares no desnaturaliza por si mismo el carácter público que posee un servicio en cuestión, si influye en el modelo de gestión consagrado por él. En Chile, la gestión privada en materia de desalación se ha establecido mediante el otorgamiento de títulos concesionales o autorizatorios a favor de particulares. El título concesional se aplica con respecto a la instalación de la industria mientras que el autorizatorio se relaciona con el aprovechamiento del agua salobre por el particular que la desea desalinizar.

La instalación de una industria desalinizadora debe entenderse sujeta al régimen de concesiones marítimas, consagrado por el Decreto con Fuerza de Ley N° 340 de 1960 y su reglamento, régimen conforme al cual es indiferente “el uso a que se destine la concesión y el lugar en que se encuentren ubicados los bienes” (artículo 3 del Decreto con Fuerza de Ley N° 340 de 1960). Ahora bien, si en principio el título concesional sólo es aplicable a la instalación (y no al aprovechamiento del agua), un título administrativo en este sentido puede también entenderse exigido por el artículo 4 del Reglamento ya citado (BCN, 2015).

En la actualidad, no existe en Chile una regulación específica para las plantas desaladoras en cuanto a su ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) bajo una tipología específica, la naturaleza jurídica del agua desalada, limitaciones y otras especificaciones que

permitan minimizar los potenciales impactos ambientales. Ante este escenario es que en el año 2021 la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR), aprobó la “Guía sobre lineamientos técnicos mínimos para la Evaluación Ambiental de Proyectos Industriales de Desalación en jurisdicción de la Autoridad Marítima”, cuyo propósito es definir y actualizar los requerimientos mínimos que deben contener los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) o Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) en la materia. (Soto, E. y Ramírez, H., 2022).

Según lo expuesto en el documento de Soto y Ramírez (2022), pese a la inexistencia de una regulación específica, se han presentado una serie de mociones parlamentarias para abordar la materia, destacándose el “Proyecto de ley sobre uso de agua de mar para la desalinización” (Boletín N° 11.608-09) que ha logrado avanzar en su tramitación legislativa. Este proyecto consta de tres artículos, en los cuales se establece la naturaleza jurídica del agua desalada como un bien nacional de uso público, el deber de restituir los acuíferos y la necesidad de contemplar una Estrategia Nacional de Desalinización que incorpore las modificaciones al DFL N° 340 de 1960 sobre Concesiones Marítimas. Entre otros proyectos de ley similares se encuentran los siguientes:

- **Boletín N° 9.862-33:** faculta al Estado para la creación de plantas desalinizadoras, con informe de la Comisión Especial sobre Recursos Hídricos, Desertificación y Sequía.
- **Boletín N° 9.185-08:** establece la desalinización del agua de mar para su uso en procesos productivos mineros.
- **Boletín N° 8.006-08:** obliga a grandes exploradores mineros a la desalinización de agua para sus procesos productivos.

2.2. Propiedades, características y clasificaciones del hidrógeno

El hidrógeno corresponde al primer elemento de la tabla periódica, su átomo está conformado por un protón y un electrón, siendo estable en forma de molécula diatómica (H_2) y en condiciones atmosféricas es un gas incoloro, inodoro y no es tóxico. Constituye aproximadamente el 75% de la materia del universo y en nuestro planeta es muy abundante, sin embargo, no se encuentra en su estado puro, sino que, combinado con otros elementos como el oxígeno y carbono, formando diferentes tipos de moléculas como agua (H_2O), amoníaco (NH_3), bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$), entre otros compuestos orgánicos. (Centro Nacional de Hidrógeno, s.f.).

En la Tabla 1, se presentan las principales propiedades físicas del hidrógeno molecular:

Tabla 1: *Propiedades físicas del hidrógeno molecular*

Parámetro	Valor	Unidad
Peso molecular	$2,016 \cdot 10^{-3}$	$kg \cdot mol^{-1}$
Punto de fusión	13,96	K
Punto de ebullición	14	K
Densidad a 4,2 K (sólido)	89	$kg \cdot m^{-3}$
Densidad a 20,4 K (líquido)	71	$kg \cdot m^{-3}$
Densidad a 0°C y 101,3 kPa (gaseoso)	$8,99 \cdot 10^{-2}$	$kg \cdot m^{-3}$
Conductividad térmica (a 25 °C)	$1,842 \cdot 10^{-1}$	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$
Calor bruto de combustión (a 25°C y 101,3 kPa)	$2,6504 \cdot 10^5$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot mol^{-1}$
Calor neto de combustión (a 25°C y 101,3 kPa)	$2,4192 \cdot 10^5$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot mol^{-1}$
Temperatura de autoignición	856	K
Límite de inflamabilidad en oxígeno	4 - 94	%
Límite de inflamabilidad en aire	4 - 94	%

Fuente: Godula, A., 2015.

Una de las características positivas del hidrógeno es su alta densidad energética, lo que implica que, en una baja cantidad de masa, almacena una gran cantidad de energía, de tal manera que su densidad es mayor que la de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y el gas natural. Por otra parte, un aspecto negativo es que, al ser un gas tan liviano, ocupa un gran volumen, lo que hace necesario comprimirlo a presiones altas, o licuarlo a temperaturas mínimas. (Generadoras de

Chile, s. f.).

Según lo expuesto por Aurelia Turbines (2019), el hidrógeno puede clasificarse en colores según la forma en que se obtenga, es decir, hidrógeno gris, azul y verde principalmente:

- **Hidrógeno gris:** es producido utilizando combustibles fósiles, como el carbón, petróleo o gas.
- **Hidrógeno azul:** cumple con el umbral de bajo carbono mediante la implementación de tecnologías de captura o aprovechamiento de emisiones, pero es generado utilizando fuentes de energía no renovables como el gas natural.
- **Hidrógeno verde:** cumple con el umbral de bajo carbono ya que no se emite CO₂ en su producción al utilizar fuentes de energías renovables como la solar o la eólica.

En la Figura 3, se muestra la clasificación mencionada anteriormente y un resumen de las características de cada tipo de hidrógeno:

Hidrógeno gris	Hidrógeno azul	Hidrógeno verde
Dividir el gas natural en hidrógeno y CO ₂	Dividir el gas natural en hidrógeno y CO ₂	Dividir el agua en hidrógeno y oxígeno por electrólisis
CO ₂ emitido a la atmósfera	CO ₂ almacenado o reutilizado	No emite CO ₂

Figura 3: Comparación de los tipos de hidrógeno. **Fuente:** Aurelia Turbines, 2019.

Tal como se menciona en la página de Generadoras de Chile (s. f.), hoy en día el hidrógeno gris y azul son más baratos de producir y su uso está más extendido que el verde, el que representa un 4% de la producción total de hidrógeno que es de aproximadamente 100 millones de toneladas. Sin embargo, se espera que la brecha sea cada vez más corta debido a la disminución de costos de las energías renovables, lo que coincide con la Figura 1, en donde se proyectan los costos entre el

año 2020 y 2050 a nivel nacional.

Con la finalidad de complementar la clasificación mencionada, es necesario conocer las principales características del agua de mar y los distintos procesos de producción de hidrógeno, tales como Termólisis, Electrólisis, Reformado y Gasificación, para comprender cuáles son los tipos de energías utilizados en cada proceso.

2.3. Características del agua de mar en el océano pacífico

El Océano Pacífico es el más grande del mundo, ocupando aproximadamente una tercera parte de la superficie de la Tierra. Es una fuente de recursos naturales muy importante para muchos países incluyendo Chile, especialmente en lo que se refiere a las actividades de pesca y acuicultura, las cuales generan ingresos y empleos en diversas regiones.

Según el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (2021), las aguas del pacífico frente a Chile alcanzan una temperatura promedio entre 8°C y 23°C, dependiendo de la región, aunque generalmente es fría debido a la corriente de Humboldt y cuenta con una salinidad que oscila entre los 33 y 35 gramos de sal por litro de agua. Además, se ha experimentado acidificación en las últimas décadas debido al aumento de dióxido de carbono en la atmósfera.

Entre las principales características del agua de mar se encuentra la presencia de sales disueltas, En la Tabla 2 se observa que el cloruro de sodio y el cloruro de magnesio, llegan a representar, entre ambos, cerca del 90% del contenido de sal en 1 litro de agua.

Tabla 2: Composición química promedio del agua de mar

Sal	Cantidad de sales en 1 litro de agua	
	Gramos (g)	Totales de sales (%)
Cloruro de sodio	27,213	77,758
Cloruro de magnesio	3,807	10,878
Sulfato de magnesio	1,658	4,737
Sulfato de calcio	1,26	3,6
Sulfato de potasio	0,863	2,465
Carbonato de calcio y trazas de otras sales	0,126	0,345
Bromuro de litio	0,076	0,217
Total	35,003	100

Fuente: López, M. ,2015, p.9.

Tabla 3: Clasificación del agua de mar en función de las sales disueltas

Clasificación	Sales totales disueltas (ppm)
Agua Potable	<500
Agua Dulce	<1000
Agua Salobre	1000-35000
Agua de mar	35000-50000
Salmuera	>50000

Fuente: Kucera, J., 2014.

2.4. Producción de hidrógeno

Dado que el hidrógeno se encuentra combinado con otros elementos, existen diferentes métodos para producirlo. Según lo expuesto por Jara (2022) y por el Centro Nacional de Hidrógeno de España (s. f.) se puede realizar la siguiente clasificación según el proceso involucrado:

- **Electrolíticos:** se utiliza electricidad, a través de un ánodo y un cátodo, para disociar agua desde su forma pura (H₂O) en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂).
- **Termoquímicos:** es a través del uso del calor y reacciones químicas aplicados en combustibles convencionales y biomasa
- **Reformado y Gasificación:** se refiere a los procesos biológicos propios de diversos

microorganismos y algas desde los cuales se puede extraer hidrógeno.

En la Figura 4, se muestran los procesos de obtención del hidrógeno mencionados anteriormente, junto al tipo de energía utilizada en cada uno.

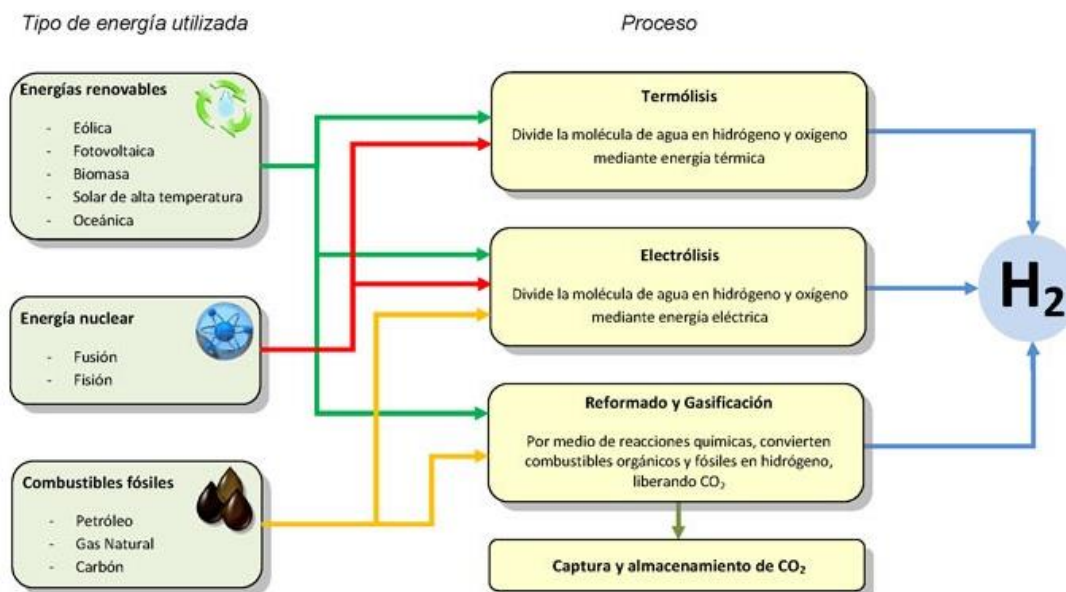


Figura 4: Procesos y energía utilizada en producción de hidrógeno. **Fuente:** Centro Nacional del Hidrógeno, s. f.

Tabla 4: Tecnologías utilizadas en los procesos de producción de hidrógeno

Proceso	Tecnología utilizada
Termoquímico	- Reformación de gas metano con vapor (SMR) - Oxidación parcial - Reformado autotérmico (ATR) - Gasificación del carbón - Gasificación de biomasa - Descomposición térmica del agua
Electrolítico- Electrólisis del agua	- Electrolizadores alcalinos - Membrana de intercambio de protones, PEM - Membrana de estado sólido, SOE
Biológicos	- Descomposición biológica del agua
Otros procesos	- Descomposición foto catalítica del agua - Subproducto de otros procesos (producción de acero, proceso Cloro Alcalino)

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de Vásquez et al., 2019, p. 16-22.

De las tecnologías mencionadas en la Tabla 4, aquellas que sirven para la producción de hidrógeno verde pero que a su vez presentan grandes desafíos son: la descomposición térmica del agua, la descomposición biológica del agua y la descomposición foto catalítica del agua. La descomposición térmica del agua involucra procesos con varias complicaciones asociadas a la recombinación de hidrógeno y oxígeno, así como la corrosión e intercambio de calor causados por la temperatura de operación (850-1.000 °C), químicos utilizados y la dificultad de conseguir una fuente de calor para el proceso. Por otra parte, la descomposición biológica del agua a partir de microorganismos fotosintéticos tiene una menor producción de H₂ por unidad de peso con 7% de eficiencia. En cuanto a la descomposición foto catalítica, es un proceso completo dado que requiere grandes cantidades de energía, alrededor de 3,7 kWh/kg de agua, porque el agua pura absorbe baja cantidades de radiación infrarroja del espectro solar, siendo insuficiente para disociar las moléculas de agua y, por lo tanto, necesita de un fotocatalizador. (Vásquez et al. 2019).

Hoy en día las tecnologías más prometedoras para la obtención del hidrógeno verde son aquellas asociadas al proceso de electrólisis, que ha aumentado el interés recientemente debido a su potencial para proporcionar hidrógeno con una baja huella de carbono al utilizar la electricidad de fuentes renovables. Una de estas fuentes son los sistemas de concentración solar (CSP), que pueden suministrar electricidad renovable de forma alternativa a la energía fotovoltaica para la electrólisis del agua. (Vásquez et al. 2019).

En la Figura 5 se aprecia los procesos de generación cuyos círculos más grandes indican una mayor capacidad estimada en kilogramos de hidrógenos por día, destacándose el reformado de gas natural, la gasificación de carbono y la electrólisis a alta temperatura. En este sentido, se observa la presencia de la electrólisis mediante la energía del viento y energía solar, demostrando su importancia en distintos procesos a mediano y largo plazo.

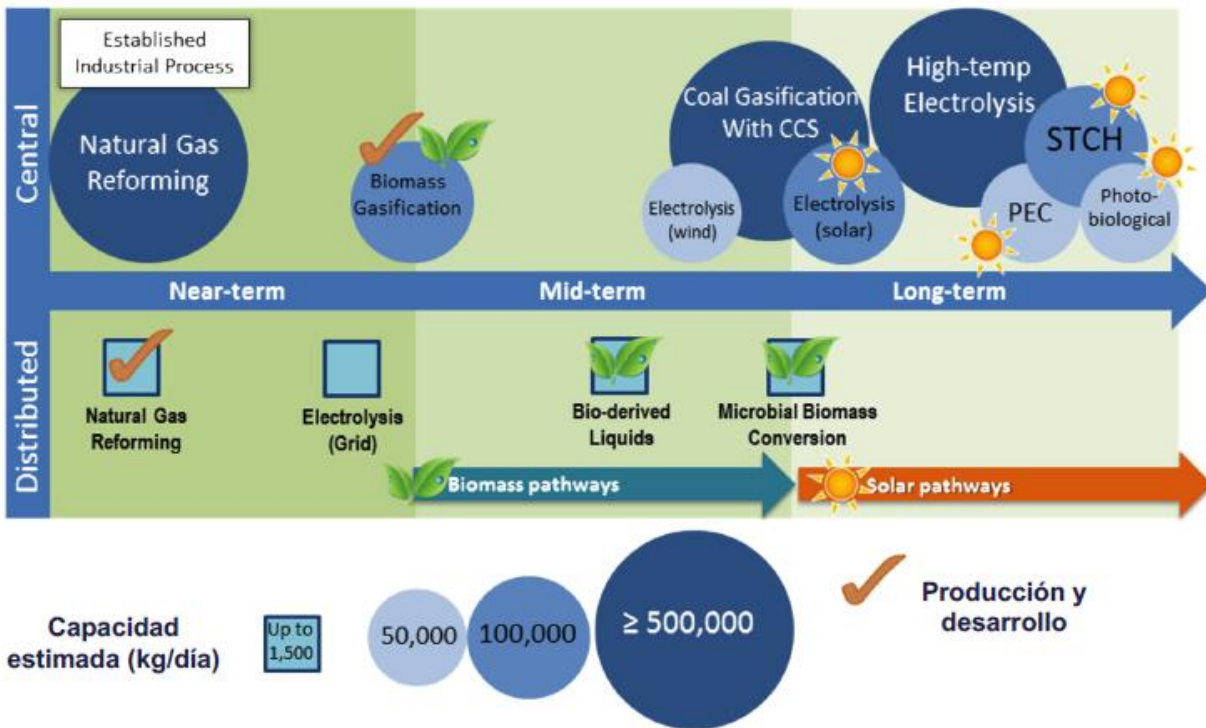
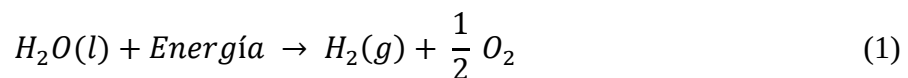


Figura 5: Capacidades estimadas de las tecnologías para la generación del hidrógeno verde. **Fuente:** U.S. Energy Information Administration (EIA), 2020.

Tomando en consideración lo mencionado, es necesario conocer el proceso de electrólisis, así como las tecnologías utilizadas en la actualidad para llevar a cabo su proceso.

2.4.1. Electrólisis

De acuerdo con lo expuesto por Vermeersch (2018), es un proceso electroquímico en el cual se sumergen 2 electrodos con un potencial eléctrico dentro de una solución acuosa, lo que provoca que el campo eléctrico generado rompa el enlace covalente del agua desencadenando la separación del hidrógeno (H_2) y el oxígeno (O). Se considera una tecnología madura siendo el método más conocido y limpio para la obtención de hidrógeno a partir del agua mediante fuentes renovables (Vásquez et al. 2019).



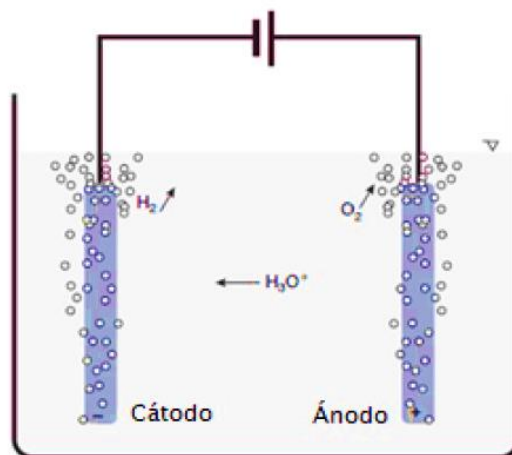


Figura 6: Principio básico de la producción de hidrógeno mediante electrólisis. **Fuente:** Vermeersch, J., 2018.

Durante el proceso de electrólisis la corriente fluye entre los electrodos separados e inmersos en un electrolito acuoso, se requiere además utilizar un separador o diafragma que evite la recombinación del oxígeno e hidrógeno. El agua utilizada durante el proceso debe ser tratada previamente para lograr niveles adecuados de purezas que eviten la deposición de minerales y el deterioro de los elementos de las celdas, con el fin de conseguir purezas en torno a un 99,999 vol. % del hidrógeno extraído (Ursúa, A et al., 2012).

Los electrodos, el electrolito y el diafragma conforman una celda electrolítica, la cual es el componente básico de un sistema de producción de hidrógeno denominado electrolizador. Las celdas pueden conectarse en paralelo o en serie (Ursúa, A et al., 2012). Según lo expuesto por Vázquez, R., Salinas, F. y GIZ (2019), y Ramírez (2022), existen cuatro tipos de electrolizadores que difieren principalmente en el electrolito utilizado (Ver Tabla 5). De mayor a menor madurez tecnológica se ordenan de la siguiente manera:

- **Alcalinos:** utiliza un líquido electrolítico de solución acuosa de hidróxidos de potasio

(KOH) o hidróxido de sodio (NaOH).

- **Membrana de intercambio de protones (PEM):** es una membrana polimérica con carácter ácido, la cual es responsable del intercambio de protones de hidrógeno.
- **Membrana de intercambio de aniones (AEM):** membrana polimérica con carácter alcalino, la cual es responsable del intercambio de aniones OH.
- **Celdas electrolizadoras de óxido sólido (SOEC):** membrana sólida cerámica para conductividad iónica.

Tabla 5: *Electrolizadores utilizados para la producción de hidrógeno verde.*

	Alcalino	PEM	AEM	SOEC	Proyección 2050
Presión	<30	<70	<35	<10	>70
Temperatura (°C)	60	80	35	600-900	
Eficiencia del sistema en términos de energía requerida (kWh/kgH ₂)	50-78	50-83	57-69	45-55	<45
Eficiencia %	42-70	39-70	47-57	60-81	
Vida útil (miles de horas)	60	50-80	5-30	<20	100
Costo de capital para núcleos/stack >10MW (USD/kW electrolizador)	270	400	-	-	<100
CAPEX (USD/kW electrolizador)	500-1400	700-1800	450-1500	2800-5600	<300
OPEX %	2-5	2-5	1-3	2-3	

Nota. el núcleo o stack corresponde al lugar en donde se produce la electrólisis, por otra parte, CAPEX se refiere al costo del sistema en términos de capital y OPEX se refiere a costos operacionales.

Fuente: Vázquez, et al., 2019, p. 19-20 y Ramírez, P., 2022, p. 5.

Ante la necesidad de agua con el mayor grado de pureza posible, se deben realizar tratamientos previos que consisten en procesos de desalinización del agua de mar, con el fin de evitar el uso de la escasa cantidad de agua dulce presente en el planeta.

2.5. Procesos de desalinización del agua de mar

Existen diversos procesos para realizar la desalinización y un criterio para clasificarlos según lo descrito por Zarza (1997) y Jiménez (2020) consiste en separar los procesos en aquellos que realizan un cambio de fase y los que funcionan sin cambio de fase:

- Con cambio de fase: Destilación Múltiple Efecto (MED), Flashing en Múltiple Efecto (MEF), Congelación, Compresión de vapor y Destilación Solar (SD)
- Sin cambio de fase: Ósmosis Inversa (OI), Electrodialisis (ED), Ultrafiltración (UF), Microfiltración (MF), Nanofiltración (NF), Ósmosis forzada (OF)

En la tabla 6 se realiza una comparación entre algunos de los métodos mencionados en cuanto a la energía necesaria y costo para obtener 1 m^3 de agua.

Tabla 6: Comparación de diversos métodos de desalinización

Método	Ventajas	Desventajas	Vida útil	Costos
MED	Aplicable en mediana y gran escala, si se reusa eficientemente la energía.	Industria decreciente. Altos cantidad de residuos minerales.	20 años	3,4 a 4 kWh/m^3 1,5 USD/m^3
MEF	Mayor capacidad instalada actualmente.	Industria decreciente. Requiere más espacio por etapas.	20 años	5 a 8 kWh/m^3 1,1 USD/m^3
MF/UF	El proceso es simple y muy utilizado en aguas salobres. Recuperación muy alta ~80 %	Postratamiento del producto concentrado. Limpieza periódica de las membranas.	7 años	0,5 kWh/m^3 0,3 USD/m^3
NF/OI	Alta tolerancia al pH. Uso de subsistemas de recuperación de energía. Sin postratamiento. Recuperación alta ~ 80%	Muy sensible a componentes orgánicos. La mayoría de las membranas no soportan temperaturas superiores a 45°C.	3-7 años	2 a 2,8 kWh/m^3 0,6 USD/m^3

Fuente: Tabla adaptada de Maldonado, L., 2017, p.7.

Como se puede observar en la tabla 6, los procesos MED y MEF requieren más energía y tienen un mayor costo para obtener 1 m^3 de agua dado que necesitan energía calorífica y eléctrica, mientras que los procesos sin cambio de fase que utilizan membranas son más baratos al utilizar sólo energía eléctrica para el accionamiento de bombas de agua. (López, 2015, p.12).

A pesar de que las membranas de microfiltración y ultrafiltración son las más baratas, no logran retener iones multivalentes como sí lo hacen las membranas de ósmosis inversa (Ver Figura 7). Esto se debe a que las membranas de MF, UF y NF tienen poros de mayor tamaño (Ver Figura 8), dejando a la OI como el método más conveniente para la desalinización y purificación de agua.

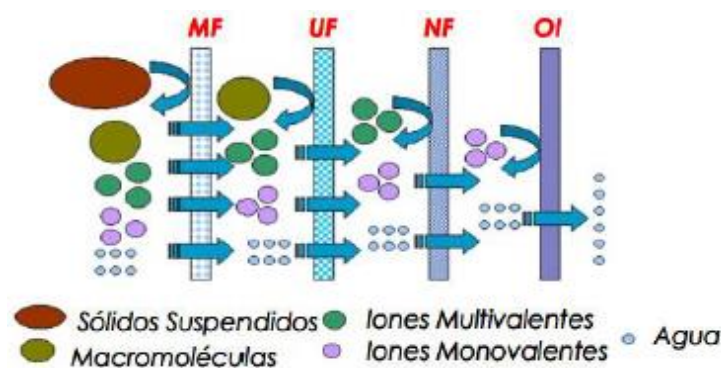


Figura 7: Niveles de rechazo de los distintos tipos de membrana. **Fuente:** Vicencio, N. y Salinas, F., 2015.

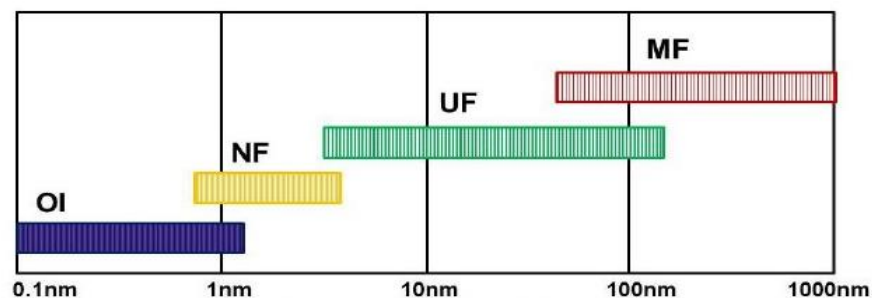


Figura 8: Clasificación de las membranas de acuerdo con el tamaño de sus poros. **Fuente:** Maldonado, L., 2017, p.9.

Existen otros factores, además de la porosidad, que generan diferencias e impactos en las membranas, entre estos se encuentran: la relación de rechazo, la hidrofobicidad, la estabilidad térmica, las propiedades mecánicas y el costo del material (Crittenden, 2012). En la tabla 7 se describe el impacto que genera cada uno de estos factores.

Tabla 7: Principales propiedades de las membranas de filtración

Propiedad	Impacto en el desempeño de la membrana
Relación de Rechazo	Indica la cantidad o el tamaño del material retenido o rechazado por la membrana.
Hidrofobicidad	Refleja la intensidad de la tensión interfacial entre el agua y la superficie de la membrana; en general, los materiales hidrofóbicos son más susceptibles al ensuciamiento.
Estabilidad Térmica	Aumenta el tiempo de vida de la membrana, ya que, al tolerar mayores temperaturas, se permite un régimen de limpieza más agresivo sin causar daños en el material.
Propiedades Mecánicas	Afecta la habilidad de soportar mejor el trabajo realizado y la presión a la que se somete el material por las válvulas y bombas del sistema.
Costo	Afecta los costos de fabricación del sistema, de acuerdo con el número total de módulos de membrana a operar.

Fuente: Maldonado, L., 2017, p.10.

Además de las propiedades mencionadas, otro aspecto que juega un rol importante en el funcionamiento de las membranas es la geometría o configuración de los poros y estructura que la conforman (Ver Figura 9). En este sentido, se puede tener membranas simétricas, en las cuales sus propiedades no dependen de la cara donde se realice el análisis; o asimétricas, en las que sus propiedades cambian de una cara a la otra. De las membranas mencionadas se puede tener homogéneas o multicapas y en cuanto al arreglo hay membranas planas, o de fibra huecas (Maldonado, 2017).

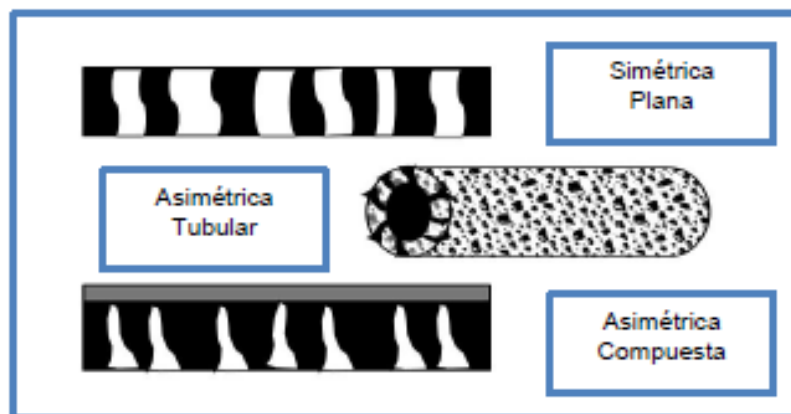


Figura 9: Configuración de membranas. **Fuente:** Obtenido de Maldonado, L., 2017.

2.5.1. Osmosis Inversa

La osmosis inversa está basada en el proceso natural de ósmosis, en que el agua fluye a través de una membrana semipermeable desde una solución de menor concentración hacia otra de mayor concentración intentando alcanzar un equilibrio. Este movimiento del agua se produce por una fuerza conocida como presión osmótica y se relaciona con el número de partículas en disolución. Si la solución diluida es agua pura, se considera una concentración $C_1 = 0$ y se llamará “presión osmótica” (π_2) a la diferencia de altura entre ambos lados de la membrana una vez alcanzado el equilibrio, por otra parte, si la concentración de la solución diluida es $C_1 \neq 0$, entonces la diferencia de alturas una vez alcanzado el equilibrio será igual a la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones ($\Delta\pi = \pi_2 - \pi_1$) (López, 2015).

En la Figura 10 se muestra el principio de osmosis inversa, que consiste en un proceso de separación por membrana a alta presión, en donde el agua pasa a través de una membrana semipermeable desde una solución con una gran cantidad de solutos a una solución de baja concentración. Este proceso se logra aplicando en la solución de mayor concentración (C_2) una presión (ΔP), tal que ($\Delta P > \Delta\pi$).

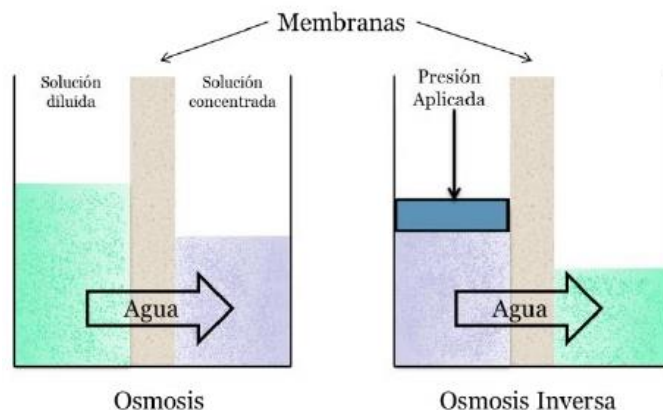


Figura 10: Proceso de ósmosis inversa. **Fuente:** Vicencio, N. y Salinas, F., 2015.

2.6. Proceso industrial de la Ósmosis Inversa

Los equipos utilizados en la industria cuentan con una configuración como la que se aprecia en la Figura 11, que permite el paso del agua en contra del gradiente de concentración de solutos, de tal manera que las moléculas de la corriente de alimentación quedan atrapadas y solo pasa el agua con bajo contenido en sólidos disueltos a la corriente de permeado (agua dulce) o también llamada corriente de filtrado, por otra parte, los solutos que no pasan por la membrana salen de la unidad de Ósmosis Inversa por la corriente de rechazo (salmuera) (Vicencio y Salinas, 2015).

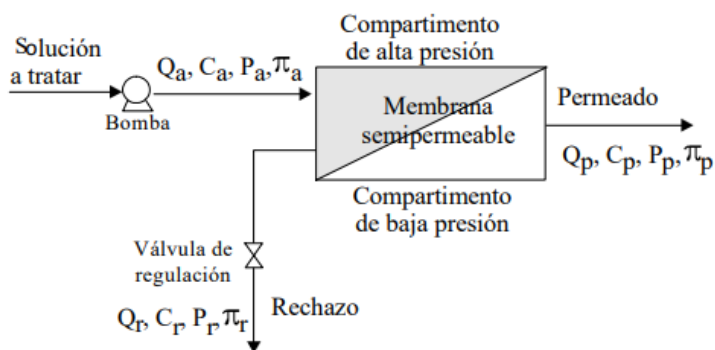


Figura 11: Esquema del proceso industrial de ósmosis inversa. **Nota.** En el esquema se mencionan las tres soluciones principales: alimentación (a), permeado (p) y rechazo (r). Las letras mayúsculas indican: Caudal Q , Concentración C , Presión hidráulica P , Presión osmótica π . **Fuente:** Fariñas, M., 1999.

Según lo expuesto por López (2015), en el proceso de osmosis inversa una membrana debe resistir presiones mucho mayores a la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones. Por ejemplo, un agua de entrada con una concentración de 35.000 ppm de Total de Sólidos Disueltos (TDS) a 25°C tiene una presión osmótica de alrededor de 25 bar, pero para obtener el permeado se necesitan 70 bar. Por otra parte, la cantidad de permeado obtenida depende de la diferencia de presiones aplicada en la membrana, sus propiedades y concentración del agua de entrada. En cuanto a su calidad, esta se encuentra entre los 300 y 500 ppm de Total de Sólidos Disueltos (TDS).

El funcionamiento de una planta de osmosis inversa es complejo al considerar que existe una agrupación de módulos, una o varias bombas y que las membranas se ensucian rápidamente con la operación continua, por lo que el agua de mar necesita un pretratamiento intensivo.

2.7. Ecuaciones asociadas a la Osmosis Inversa

Las siguientes ecuaciones nombradas por López (2015), son necesarias para comprender los fenómenos relacionados a la ósmosis inversa y el agua de rechazo.

2.7.1. Coeficiente de permeabilidad de la membrana (A)

Corresponde al volumen de agua que atraviesa la membrana por unidad de superficie, tiempo y presión, a una temperatura y salinidad determinadas y constantes.

$$A = \frac{\text{Solvente } [m^3]}{\text{área membrana } [m^2] * \text{unidad de tiempo } [día] * \text{unidad de presión} [bar]}$$

2.7.2. Factor de recuperación (Y)

Es el porcentaje de permeado obtenido a partir de un determinado caudal de alimentación.

$$Y = 100 \cdot \frac{Q_p}{Q_a}$$

Donde:

Q_p : caudal de permeado.

Q_a : caudal de aporte.

Además, el cociente entre el caudal de permeado y el caudal de aporte se conoce como factor de conversión:

$$y = \frac{Q_p}{Q_a}$$

Luego, es posible obtener un factor de concentración (FC) a partir de la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{1}{1 - y}$$

2.7.3. Factor de rechazo de sales (R) y paso de sales (Ps)

El rechazo de sales es un factor que determina la calidad final de permeado de un sistema de ósmosis inversa. Es el parámetro más importante de la membrana y está basado tanto en el proceso de fabricación como en los polímeros que forman la membrana.

$$R = 100 \cdot \frac{C_a - C_p}{C_a}$$

Donde:

C_a : concentración de aporte.

C_p : concentración de permeado.

$$P_s = 100 \cdot \frac{C_p}{C_a}$$

2.7.4. Concentración de permeado (Cp) y concentración de rechazo (Cr)

La concentración de rechazo se utiliza en el diseño de una planta de ósmosis inversa para establecer la forma de eliminación del caudal, dada su importancia en torno a la contaminación que puede generar.

Concentración de permeado:

$$C_p = (1 - R) \cdot \frac{C_a + C_r}{2}$$

Concentración de rechazo:

$$C_r = R \cdot \frac{C_a}{1 - Y}$$

2.8. Tipos de membranas de ósmosis inversa

Las mayores cantidades de membranas para ósmosis inversa disponibles comercialmente corresponden a las de tipo asimétrica de celulosa y a las de tipo compuesta de capa fina (TFC) (Li *et al.*, 2010).

2.8.1. Membranas Asimétricas

Las membranas de tipo asimétrica generalmente están compuestas por capas de soporte y una capa activa tal como se aprecia en la Figura 12. Las capas de soporte son membranas de ultrafiltración, normalmente elaboradas con polisulfona, y como capa activa se utiliza membranas de acetato de celulosa o bien de poliamidas (Kucera, 2014).

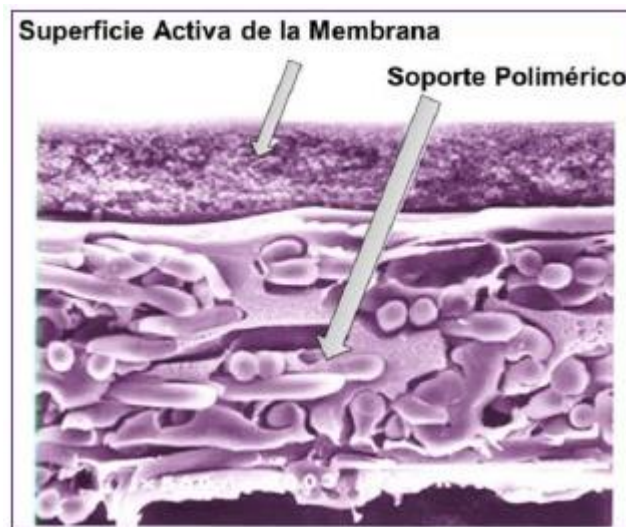


Figura 12: Estructura de una membrana comercial de ósmosis inversa. **Fuente:** Maldonado, L., 2017)

Las membranas comerciales utilizan principalmente dos grupos poliméricos: el acetato de celulosa (AC) y poliamida (PA), las cuales comúnmente tienen como soporte la polisulfona (PSU). En general, la vida útil de las membranas es de 5 a 10 años y cada material polimérico que las compone tiene diferentes tolerancias químicas, métodos de fabricación, condiciones de operación y desempeño (Maldonado, 2017).

2.8.2. Membranas de capa fina (TFC)

Se definen como una bicapa formada en dos etapas. En la primera etapa de síntesis, se forma la capa porosa no selectiva, la cual es cubierta en su superficie por una capa densa y delgada. Las dos capas son diferentes en sus composiciones químicas (Petersen, 1993).

De acuerdo con lo descrito en el documento de Vicencio (2015), entre algunas ventajas de las membranas compuestas en relación con las membranas asimétricas se encuentra que cada capa puede ser optimizada por separado, la capa densa y delgada para la combinación flujo de permeado y rechazo de solutos, mientras que la capa de soporte porosa se optimiza para maximizar su resistencia a esfuerzos de corte y compresión, así como la minimización de su resistencia al flujo de permeado. En cuanto a los compuestos químicos, la capa superficial densa y delgada se puede formar con polímeros lineales como en el caso de las membranas asimétricas o de entrecruzamiento, los cuales otorgan mayor permeabilidad de agua y resistencia.

Las membranas TFC muestran un superior flujo de permeado (agua) y rechazo de solutos (sales), resistencia a la presión de compactación y mayores rangos de operación en cuanto a temperatura y pH, así como una mayor estabilidad ante ataques biológicos en comparación con las membranas de celulosa (Li et al., 2010). Sin embargo, un aspecto negativo de las membranas TFC es su mayor susceptibilidad al ataque de compuestos clorados y la formación de incrustaciones.

2.9. Impactos ambientales en la producción de hidrógeno verde

Si bien el hidrógeno verde está clasificado bajo el concepto de cero emisiones de dióxido de carbono al tener fuentes de energía renovables como un compromiso de cuidado al medio ambiente, existen efectos secundarios a partir de los mecanismos y sistemas utilizados que influyen en el ecosistema, como por ejemplo, la descarga de salmueras al mar, la alteración de paisajes ante la necesidad de espacio para instalar aerogeneradores o paneles solares, el efecto de dichos aerogeneradores sobre las aves y la contaminación provocada por desechos de materiales como es el caso de las membranas de ósmosis inversa una vez que cumplen su ciclo de vida.

2.9.1. Desechos de salmuera

Si bien en Chile es muy reciente la implementación de tecnologías para la obtención de hidrógeno verde ligadas a la desalinización de agua de mar, existen plantas desalinizadoras que se han construido para suplir la creciente necesidad de agua potable, así como para su uso en la industria y minería. La primera planta construida en 2003 corresponde a la Empresa pública ESSAN S.A con una capacidad de 600 l/s y un abastecimiento de 50% del agua potable para la ciudad de Antofagasta; la segunda planta en funcionamiento a partir del 2006 corresponde a Minera Escondida con una capacidad que aumentó de 525 l/s a 2.500 l/s siendo la de mayor capacidad en Chile y desde ese año al 2021 se llegó a tener 23 plantas en operación, siendo 14 del sector minero e industrial y 9 del sector sanitario, urbano y rural con una capacidad total de 5.619 l/s (MOP, 2021). A finales de 2019 Minera Escondida llegó a los 3.800 l/s. (BHP, 2022).

La desalinización expresada en cifras se puede entender como bajar las sales disueltas de 38.000 mg/L (agua de mar) a menos de 500 mg/L (agua potable, o de consumo humano).

En general, un dispositivo desalinizador separa esencialmente agua con alta concentración

de sales en dos corrientes: una con baja concentración de sales disueltas (la corriente de agua fresca) y la otra salmuera (solución concentrada de sales) (BCN, 2017).

Winckler (2021) menciona que la salmuera además de ser un residuo hipersalino (Ver Tabla 8), contiene aditivos utilizados en la limpieza de filtros y las membranas, como, por ejemplo, antiincrustantes (e.g. fosfato, ácido málico y ácido sulfúrico), anticorrosivos (sulfuro de sodio), antifouling (de base cloro), y metales pesados, entre otros, tal como se aprecia en la Tabla 9.

Tabla 8: *Principales características de los vertidos de salmuera producto del uso de la tecnología de ósmosis inversa.*

Ósmosis Inversa	
Tasa de conversión promedio (%)	42-45
Salinidad (psu)	60-85
Cloro	Neutralizado antes de contacto con membranas
Temperatura (°C)	0-2,5
Oxígeno disuelto	Igual o ligeramente más bajo
Metales pesados	Podría contener niveles bajos de Cr, Fe, Mo y Ni si se emplean equipamientos con acero inoxidable de baja calidad
Elementos químicos	Pretratamiento, limpieza de filtros y membranas

Fuente: Sola, I., 2021, p.21.

Tabla 9: Principales elementos químicos empleados durante el proceso de desalación y su presencia en vertidos de salmuera en el uso de la tecnología de ósmosis inversa.

Sustancias químicas	Ósmosis Inversa
Antiincrustantes	Podrían estar presentes sustancias poliméricas (polifosfatos, fosfonatos y ácidos policarbonicos). Se pueden emplear productos químicos adicionales para tratar otros elementos
Coagulantes	Podría estar presente cloruro férrico, sulfato de hierro y polielectrolitos.
Floculantes	Polimeros catiónicos
Agentes de limpieza	El uso de detergentes, biocidas e hidrocarburos halogenados podrían estar presentes

Fuente: Sola, I., 2021, p.23.

Dado que la salmuera no sufre variaciones muy significativas durante la osmosis “temperaturas no mayores a 1°C por sobre el agua circundante” (BCN, 2017), la alta salinidad se traduce en una flotabilidad negativa de la salmuera al ser vertida en el mar. Una vez realizada la descarga, la pluma salina describe una trayectoria aproximadamente parabólica en sus cercanías y la eficiencia de mezcla en la región depende del sistema de vertido (difusor), de las características físicas del efluente y las del medio receptor. Una vez que la pluma salina impacta en el fondo marino, se reducen los procesos turbulentos de la descarga y se genera un flujo estratificado hacia el campo lejano, en donde el flujo depende de la diferencia de densidad entre la salmuera y el medio, de la rugosidad, de la barimetría, las corrientes y del efecto oleaje en el fondo, por lo que el proceso de mezcla tiene una escala espacial del orden de kilómetros y una temporalidad que puede ir desde horas hasta días, haciendo que la pluma salina pueda desplazarse grandes distancias con una escasa disolución (Ver Figura 13). (Winckler, 2021).

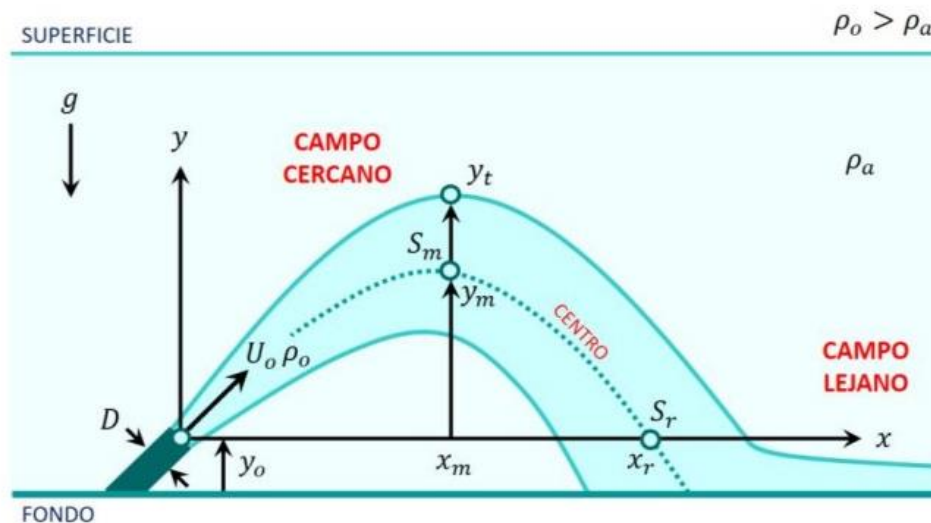


Figura 13: Esquema de una pluma salina de boyantes negativa. **Fuente:** Winckler, P., 2021.

El vertido de sal adicional causa un aumento de temperatura en las aguas costeras y disminuye el nivel de oxígeno, lo que puede provocar zonas muertas. Estas condiciones hacen difícil que los organismos acuáticos de dichas zonas obtengan el oxígeno necesario para vivir, así como también afecta la vida de aquellos organismos marinos que son sensibles a los cambios de salinidad del ecosistema. (Aimone, 2020).

En cuanto al impacto sobre microorganismos, variados estudios se han realizado en ecosistemas de poca profundidad en zonas del mediterráneo en donde la pluma salina de mayor densidad se desplaza a lo largo del fondo marino. En estas condiciones, los organismos que componen el bento (fondo acuático), sobre todo los organismos sésiles (sin capacidad de movimiento), reciben la mayor descarga de salmuera, por ejemplo, las praderas de algas submarina como son las de Posidonia oceánica, cuyo rol es retener sedimentos, protección de la línea costera, servir de hábitat para ciertos organismos y preservar la biodiversidad, las cuales se han visto reducidas en biomasa y afectadas en su estructura ecológica. Por otra parte, se apreció que la descarga de salmuera generó la desaparición de comunidades originales que fueron reemplazadas por organismos como poliquetos, serpúlidos, sabélidos y crustáceos balano, los cuales son propios

de situaciones de estrés (BCN, 2017).

También es importante mencionar que en el caso de las tomas de agua de mar para desalación se absorben conjuntamente organismos planctónicos, larvas, huevos de peces, entre otros, que resultan dañados o muertos al pasar por los sistemas de filtros de las bocas de succión. (BCN, 2017).

2.9.2. Desechos de membranas de ósmosis inversa

La ósmosis inversa (OI) es la tecnología de desalinización más implementada y extendida alrededor del mundo, sin embargo, deben resolverse algunos desafíos ambientales para cumplir con los principios de la economía circular. Las membranas de OI tienen una vida útil que va desde los 5 a 10 años para la desalinización de agua de mar, tras la reducción de rechazo de sal y declinación de flujo, generando residuos de membranas que se depositan en vertederos y, en menor medida, se incineran. Se estima que en el año 2015 se eliminaron alrededor de 800.000 módulos de ósmosis inversa en todo el mundo, una cifra que rodea las 14.000 toneladas (Senán et al., 2019).

Los principales componentes de las membranas son plásticos inertes no peligrosos, que tardan entre 400 y 5.000 años en descomponerse. La cantidad de residuos va en aumento de forma proporcional al crecimiento de la tecnología, por lo que se espera que al año 2025 se alcance 1.5 millones de membranas desechadas y 25.500 toneladas de plástico (Senán et al., 2020)

2.10. Antecedentes internacionales ligados a la producción de hidrógeno verde

Considerando una producción de hidrógeno verde a partir de energía eólica y solar, se estima que la demanda de hidrógeno para un futuro lejano llegue a los 2,3 Gt por año, y la obtención del agua para ese entonces sería muy costosa. De acuerdo con la estequiometría de la reacción de electrólisis, por cada kg de hidrógeno producido, se necesitan 9 kg de agua y, por lo

tanto, para obtener 2,3 Gt de hidrógeno se requieren 20,5 Gt o 20,5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce. La obtención de agua desalinizada mediante OI es de aproximadamente un 50%, en donde por cada metro cúbico de agua limpia producida se necesitan 3,5 – 5 kWh de energía. (ACS Energy Lett, 2021).

2.10.1. Utilización y tratamiento de residuos

2.10.1.1. Tratamientos de membranas

De acuerdo con lo mencionado por León et al. (2021), en su artículo de investigación desarrollado en Canarias y Macaronesia, las membranas de osmosis inversa podrían reutilizarse en la misma u otra planta desaladora o se podrían reciclar sus componentes y elementos.

En términos de reutilización se podrían considerar las siguientes opciones:

- Reemplazar entre sí aquellas membranas que participan en los procesos de las plantas desaladoras con dos etapas aplicando una limpieza previa, pues las membranas de la primera etapa tienden a ensuciarse más que las de segunda etapa.
- Aplicación de membranas de segunda mano en equipos de diálisis en hospitales, concentración de suero de leche, concentrado de vino, concentrado de zumo de frutas, concentrado de café o concentrado de jarabe de glucosa.
- Aplicación en lixiviados procedentes de vertederos que tengan salinidad similar a la del agua de mar, pues dichos lixiviados luego del tratamiento podrían ser utilizados como fertilizante.
- Oxidación de membranas de OI mediante la aplicación de cloro para obtener membranas de NF y UF.

Entre el año 2014 y 2018 se llevó a cabo un proyecto europeo llamado LIFE+13 ENV/ES/000751 TRANSFOMEM, cofinanciado por la Unión Europea y que consistió en la

transformación y reutilización de membranas de ósmosis inversas, por parte de las empresas IMDEA Agua, SADYT y VALORIZA AGUA a escala piloto. Esto se logra porque las membranas de ósmosis inversa del mercado están formadas por 3 capas: una de poliamida aromática que actúa como una barrera selectiva y está en contacto con el agua, luego una capa de soporte micro porosa de polisulfona que habitualmente es una membrana de ultrafiltración y por último un soporte estructural de poliéster (REMTAVARES, 2015).

La poliamida es un polímero altamente sensible a la exposición de agentes oxidantes como el hipoclorito de sodio. Aprovechando esta sensibilidad, este agente químico se emplea para degradar de forma controlada la capa de poliamida. Si esta degradación se produce de forma parcial, se obtienen membranas con propiedades típicas de las membranas de nanofiltración. Sin embargo, una degradación total de la poliamida da lugar a membranas de polisulfona con propiedades típicas de las membranas de ultrafiltración (Figura 14). Las membranas transformadas obtenidas mediante este método se pueden reutilizar en otros procesos. Por un lado, las membranas de nanofiltración podrían ser recicladas e implementadas en los procesos de ablandamiento de agua salobre. Y las membranas con características típicas de ultrafiltración se podrían emplear en el pretratamiento de agua salobre y de agua de mar y en el tratamiento terciario de agua residual (REMTAVARES, 2015).

Según lo explicado por León et al. (2021), la oxidación de las membranas de OI debe ser realizado con cantidades dosificadas de cloro libre en el tiempo, como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10: Concentraciones de cloro libre para la oxidación de membranas de ósmosis inversa

Caso	Concentración de cloro libre (ppm)	Tiempo de exposición (hr)	Nivel de exposición (ppm x hr)
A	124	50 (NF) – 242 (UF)	
B	1240	5 (NF) – 24,2 (UF)	6200 (NF)
C	6200	1 (NF) - 4,84 (UF) / 48,4 (UF)	30000-300000 (UF)
D	1240	0,5 (NF)– 2,42 (UF)	

Fuente: León et al., 2021, p. 433.



Figura 14: Esquema conceptual del proceso de transformación de las membranas de OI en membranas de NF y UF. **Fuente:** REMTAVARES, 2015.

En cuanto al reciclaje de componentes y elementos de la OI, en el documento de León et al. (2021) se describe como el proceso que cumple el objetivo de convertir los residuos en nuevos productos o en materia prima que permitan su posterior utilización, sin llegar a su eliminación. En este sentido, existen cuatro categorías principales para llevar a cabo el tratamiento y reciclado de desechos sólidos plásticos:

- Primaria (re-extrusión): corresponde a la reintroducción de desechos limpios en el ciclo de extrusión.
- Secundaria (mecánica): consiste en la trituración física de plásticos compatibles

(residuos poliméricos simples y homogéneos), que son separados de contaminantes y lavados para utilizarse como materia prima

- Terciaria (química): es la descomposición de material plástico en pequeñas moléculas que se reutilizan en procesos petroquímicos, creando cadenas de polímeros. Este proceso no puede utilizarse típicamente con materiales contaminados.
- Cuaternaria: se refiere a la recuperación de energía

Entre las categorías mencionadas las más adecuadas corresponden al proceso mecánico y químico. En el mecánico cada material de la membrana podría considerarse por separado como por ejemplo el espaciador de polipropileno de alimentación y el espaciador de permeado, por otra parte, las láminas de membrana plana están construidas con diferentes tipos de materiales (poliamida aromática, polisulfona, poliéster, etc) y pueden contaminarse con cualquier tipo de sustancia de uso prolongado pudiendo añadir biofouling e incrustación de sales haciendo muy difícil la separación de dichos materiales, y por lo tanto, el proceso más adecuado sería el químico ya que es más barato que el proceso mecánico y puede procesar polímeros heterogéneos con uso limitado de pretratamiento, aunque puede resultar más complejo y no puede utilizarse con materiales contaminados. El reciclado químico podría ser viable a través de una industria pirolítica, pues el pirólisis se encuentra entre las principales categorías de procesamiento térmico que incluyen la incineración, procesamiento térmico en ausencia de oxígeno, gasificación y conversión catalítica en combustible (León et al., 2021, p. 432).

2.10.1.2. Tratamientos y reutilización de agua de rechazo

Una técnica consiste en realizar el vertido de salmuera alejado de los ecosistemas delicados de tal manera que se disperse y se diluya rápidamente, para esto se utilizan dos métodos, el primero consiste en un vertido mediante emisario submarino colocando difusores en la tubería de descarga, colocándolo a una altura determinada sobre el nivel del mar y con una inclinación que varía entre el 30 y 90% respecto al fondo de tal manera que el flujo del vertido se dirija a la superficie, por otra parte, el segundo método consiste en realizar una dilución previa del vertido reteniendo la salmuera de rechazo en un depósito y mezclándola con agua procedente directamente del mar con una porción 1:4 para luego verter dicha mezcla al mar. En cuanto a los inconvenientes de cada método, el primero es menos eficaz para diluir la salmuera, mientras que el segundo necesita un mayor consumo energético dado que requiere un grupo de bombeo adicional, así como un depósito, lo que supone un mayor costo en mantenimiento (Nuevo, D., 2020).

De acuerdo con lo descrito por Nuevo (2020), hay tres opciones de reutilización, la primera utilizada en Israel y Grecia en donde se aplica una técnica llamada “Brine Mining” (minería de la salmuera), que consiste en la obtención de sales y productos químicos a partir de fluidos que cuentan con una elevada concentración de sal y cuya aplicación más frecuente es la producción de sal de mesa. La segunda opción corresponde a la evaporación-cristalización que permite la obtención de sales como “Anhidrita (CaSO_4), Bischofita ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), Calcita (CaCO_3), Carnalita ($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Halita (NaCl), Hexahidrita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), Kieserita ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Langbeinita ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$), Mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), Thenardita (Na_2SO_4), Silvinita ($\text{KCl} + \text{NaCl}$), y Silvita (KCl)”. La tercera opción consiste en utilizar la salmuera para el deshielo de carreteras aprovechando sus propiedades deshidratantes.

En el documento de Peñaloza y Morales (2019) se aborda una propuesta de reutilización del agua de rechazo de osmosis inversa para tratamientos de hemodiálisis en un hospital de tercer nivel (centro médico de alta complejidad con presencia de subespecialidades médicas), en donde se realiza un estudio de los componentes químicos del agua, así como los parámetros de acuerdo con la normatividad de las aguas tratadas llegando a dos alternativas de uso: la primera corresponde a uso en procesos de riegos de zonas verdes y áreas comunes, mientras que la segunda se refiere a la utilización en la descarga de sanitarios del área administrativa y operaria.

En cuanto a los métodos de evaporación de sales es necesario considerar que, a mayor concentración de sales en la solución a evaporar, mayor es el incremento en el calor de evaporación y se hace necesario exponer la salmuera en una secuencia de procesos de evaporación/precipitación que permitan obtener las sales precipitadas. Actualmente este proceso se encuentra en investigación por parte de la UTEC y es financiado por la empresa NEXA. (UTEC, 2019)

Una última alternativa es la obtención de sales termo-solares, este tipo de sales están compuestas de Nitrato de Sodio y Nitrato de Potasio, se utilizan para el almacenamiento térmico y la transferencia de calor en las Plantas de Energía Solar Concentrada (CSP) en un sistema de almacenamiento de sales fundidas para aumentar la producción eléctrica ya que se mantiene en funcionamiento durante horas de la tarde y días nublados. En la actualidad la empresa SQM produce cerca de 1,5 millones de toneladas de estas sales a partir de abundantes depósitos de caliche y salmuera (SQM, 2023).

3. ANÁLISIS Y DESARROLLO

3.1. Plantas de hidrógeno verde: modelos, sistemas de desalinización y membranas

La membrana de OI es una tecnología utilizada comúnmente para desalinizar agua y eliminar contaminantes, en este sentido de acuerdo con la información compartida por la empresa de ingeniería medioambiental Condorchem Envitech (s.f.), las plantas de OI se distribuyen de la siguiente manera según sus objetivos:

- 50% en desalinización de agua de mar y agua salobre
- 40% en producción de agua ultrapura para industrias de tipo electrónica, farmacéutica y de producción de energía.
- 10% en sistemas de descontaminación de aguas urbanas e industriales

Respecto a la desalinización del agua de mar, según la zona geográfica la salinidad del agua se encuentra en un rango de [30.000 - 40.000] mg/L y para conseguir condiciones de potabilidad se utilizan membranas de poliamida de fibra hueca que permiten conseguir coeficientes de rechazo superiores al 99,3% con presiones de trabajo de 50 bar – 70 bar.

Los costos de operación de las plantas que realizan tratamientos de desalinización de agua de mar se estiman entre 1- 1,25 \$US/L de agua tratada al día, entre uno de los factores que inciden en este costo es el ensuciamiento de las membranas, por esta razón, se busca alargar la vida de las membranas mediante un pretratamiento del agua de alimentación aplicando una filtración y luego una ultrafiltración o nanofiltración (Condorchem, s.f.).

3.1.1. Plantas de hidrógeno verde

En Chile se han puesto en marcha cinco proyectos para la producción de hidrógeno verde con la finalidad de alcanzar la meta de carbono neutralidad al año 2050 y que producirán 45.000 toneladas de hidrógeno verde al año (Ver Tabla 11).

Tabla 11: *Proyectos de producción de hidrógeno verde en Chile con entrada en operación para el año 2025.*

Proyecto	Empresa	Producción esperada [ton _{H2} /año]	Producción esperada [ton _{H2} /día]	Potencia del electrolizador [MW]
Engie y Enaex (HyEx)	Engie	3.200	8,767	26
Antofagasta Mining Energy Renewable (AMER)	Air Liquide	10.950	30	80
HyPro Aconcagua	Linde	3.000	8,219	20
Hidrógeno Verde Bahía Quintero	GNL Quintero S. A	500	1,37	10
H2V CAP	CAP	1.550	4,247	12

Fuente: *Marca Chile, 2022.*

Uno de los factores más importantes en una planta de hidrógeno verde es el tipo de tecnología electrolizadora a utilizar. En el marco teórico se mencionan 4 tipos: Alcalino, PEM, AEM, SOEC, de las cuales la membrana de intercambio de protones PEM resulta ser la más eficiente, al tener una relación de reducción más alta, mayor seguridad gracias a la ausencia de KOH, cuenta con un diseño más compacto debido a densidades y presiones de operación más altas (Araneda, 2022).

Con el fin de encontrar información sobre tipos de electrolizadores que cumplan con las producciones de hidrógeno de los proyectos mencionados en la Tabla 11 y que sirvan de guía para obtener los tipos de membranas utilizadas, se toma como base la construcción del proyecto Haru

Oni, la planta de producción de hidrógeno verde y e-combustibles de Magallanes que partió el año 2022 y que utiliza un electrolizador modelo Silyzer 200 de Siemens Energy, el cual utiliza una membrana protónica (PEM) y que cuenta con una potencia nominal de 2MW (Econojournal, 2022).

Según lo expuesto en la página de Chile Desarrollo Sustentable (2023), en el mercado de los electrolizadores PEM, además de la Siemens, se encuentran otras empresas dedicadas a la producción de electrolizadores como, por ejemplo: ThyssenKrup, NEL, Enapter, Linde Engineering, Plug Power, HydrogenPro, UTM, MCphy, Bloom Energy y Haldor Topsoe. Sin embargo, entre los actores mencionados sólo algunos tienen productos en venta, mientras que otros como Linde Engineering se encuentran desarrollando nuevos modelos. En la Tabla 12 se muestra una comparación de algunos electrolizadores disponibles:

Tabla 12: Modelos y especificaciones de electrolizadores PEM

Marca	Modelo	Potencia [MW]	Producción H ₂ [kg _{H2} /h]	Consumo de agua [l/kg _{H2}]
Nel	M4000	18	442,4	10
Plug Power	Plug EX – 4250D	10	177	13
Plug Power	GenFuel 5MW	5,5	90	9
Siemens	Silyzer 300	8,7 – 17,5	165-330	10
Siemens	Silyzer 200	1,25	20	16,68

Fuente: Araneda (2022), Plug Power (2023) y Dokumen.tips (s.f.)

Entre los modelos mencionados en la Tabla 12, los que tienen menor consumo de agua y mayor cantidad de producción de hidrógeno verde por hora son los modelos Nel M4000 y Siemens Silyzer 300. Sin embargo, se decide trabajar con el segundo debido a la cantidad de información disponible.

El Silyzer 300 tiene una composición completa formada por 24 módulos al que se le denomina arreglo, el cual produce un máximo de 330 kg_{H2}/h, lo que se traduce en 7,92 ton_{H2}/día,

pero también se puede optar por una configuración que comprende 12 módulos y produce 165 kg_{H_2}/h , es decir, 3,96 $ton_{H_2}/día$ (Araneda, 2022). Considerando lo anterior, los proyectos H2V CAP e Hidrógeno Verde Bahía Quintero necesitan un arreglo cada uno, sin embargo, para cubrir la cuota de hidrógeno del proyecto HyEx se necesita un arreglo y medio, para el proyecto AMER se necesitan cuatro arreglos y para el proyecto HyPro se necesita un arreglo y medio.

Una vez conocidas las necesidades de electrolizadores se debe seleccionar la planta de desalinización, cuya dimensión depende del consumo de agua del electrolizador. En este caso, el modelo seleccionado necesita 10 litros de agua para producir 1 kg de hidrógeno, por lo tanto, para suplir las necesidades de hidrógeno por día y tomando en consideración los arreglos para cada proyecto se realizan los siguientes cálculos:

$$1 \text{ arreglo: } 330 \frac{Kg_{H_2}}{h} \cdot 24 \frac{h}{día} \cdot 10 \frac{l_{agua}}{Kg_{H_2}} = 79.200 \frac{l_{agua}}{día} \cdot 0,001 \frac{m^3}{l_{agua}} = 79,2 \frac{m^3}{día}$$

$$1,5 \text{ arreglos: } (330+165) \frac{Kg_{H_2}}{h} \cdot 24 \frac{h}{día} \cdot 10 \frac{l_{agua}}{Kg_{H_2}} = 118.800 \frac{l_{agua}}{día} \cdot 0,001 \frac{m^3}{l_{agua}} = 118,8 \frac{m^3}{día}$$

$$4 \text{ arreglos: } (4 \cdot 79.200) \frac{l_{agua}}{día} = 316.800 \frac{l_{agua}}{día} \cdot 0,001 \frac{m^3}{l_{agua}} = 316,8 \frac{m^3}{día}$$

Considerando las cantidades anteriores, se procede a seleccionar un sistema de desalinización de agua de mar por membranas de ósmosis inversa. Para esto se cotiza en la empresa Pure Aqua Inc., de Estados Unidos, que ofrece equipos tanto para escala comercial (capacidad de 1,4 hasta 37,9 $m^3/día$), como para escala industrial (capacidad de 30 hasta 2.500 $m^3/día$). En este caso, se seleccionan los de escala industrial que funcionan con membranas de osmosis inversa de 8 pulgadas cuyas configuraciones son del tipo enrolladas en espiral TFC. En la Tabla 13 se muestran los modelos disponibles y en la Tabla 14 los precios asociados.

Tabla 13: Modelos de quipos de ósmosis inversa industriales

Número de modelo	Caudal		Cantidad de Membranas de 8" (Un paso)	Motor HP		Peso Aproximado (Libras)	Dimensiones
	GPD	m3/Día		a 1000 ppm			
				60 HZ	50 HZ		
SW-8.0K-1280	8000	30	2	15	15	2600	120"x42"x72"
SW-12K-1380	12000	45	3	20	25	2650	160"x42"x72"
SW-16K-1480	16000	61	4	25	30	2700	195"x60"x72"
SW-24K-2380	24000	91	6	40	45	3200	160"x60"x72"
SW-32K-2480	32000	121	8	60	65	4200	195"x72"x72"
SW-48K-2680	48000	182	12	75	80	5600	280"x72"x72"
SW-64K-4480	64000	242	16	60	65	6500	195"x72"x72"
SW-72K-3680	72000	273	18	60	65	12000	280"x72"x80"
SW-96K-4680	96000	363	24	85	100	13000	280"x72"x80"
SW-112K-4780	112000	424	28	100	110	14000	350"x72"x80"
SW-136K-5680	136000	515	34	110	120	15000	280"x72"x80"
SW-168K-6780	168000	636	42	120	130	16000	350"x72"x80"
SW-196K-7780	196000	742	49	130	150	16500	350"x72"x80"
SW-224K-8780	224000	848	56	160	175	17000	350"x72"x79"
SW-252K-9780	252000	954	63	175	190	18000	350"x72"x79"
SW-280K-10780	280000	1060	70	190	190	19000	350"x72"x79"
SW-317K-12780	317000	1200	84	190	290	20000	350"x85"x80"
SW-420K-15780	420000	1590	105	290	320	21200	350"x85"x80"
SW-500K-18780	500000	1893	126	320	320	22000	350"x85"x81"
SW-660K-18880	660000	2500	144	350	350	27000	395"x85"x81"

Fuente: Pure Aqua Inc., 2023.

Tabla 14: Precios de sistemas de ósmosis inversa (con pre y post tratamiento incluido)

Modelo	Caudal nominal de producción	Potencia	Precio para captación con pozo		Precio para captación directa del mar	
	[m³/d]	[HP]	[USD \$]	[Ch \$]	[USD \$]	[Ch \$]
SW-8K-1280	30	15	78.995	52.515.757	110.052	73.162.684
SW-12K-1380	45	25	85.162	56.615.519	118.644	78.874.296
SW-16K-1480	61	30	91.740	60.988.598	127.808	84.966.681
SW-24K-2380	91	45	104.074	69.188.122	144.991	96.389.904
SW-32K-2480	121	65	116.407	77.387.646	162.174	107.813.127
SW-48K-2680	182	80	141.486	94.060.012	197.112	131.040.347
SW-64K-4480	242	65	166.154	110.459.060	231.478	153.886.792
SW-72K-3680	273	65	178.899	118.931.902	249.234	165.690.789
SW-96K-4680	363	100	215.900	143.530.474	300.783	199.960.457
SW-112K-4780	424	110	240.979	160.202.839	335.722	223.187.677
SW-136K-5680	515	120	278.392	185.074.729	387.843	257.838.119
SW-168K-6780	636	130	328.138	218.146.142	457.148	303.911.785
SW-196K-7780	742	150	371.718	247.117.794	517.861	344.273.839
SW-224K-8780	848	175	415.297	276.089.446	578.574	384.635.892
SW-252K-9780	954	190	458.877	305.061.097	639.287	424.997.946
SW-280K-10780	1.060	190	502.456	334.032.749	700.000	465.360.000
SW-317K-12780	1.200	290	560.014	372.297.194	780.187	518.668.373
SW-420K-15780	1.590	320	720.354	478.891.007	1.003.565	667.170.269
SW-500K-18780	1.893	320	844.925	561.706.200	1.177.113	782.544.819
SW-660K-18880	2.500	350	1.094.479	727.609.903	1.524.781	1.013.674.694

Fuente: Zuñiga, F. (2017).

Entre los modelos disponibles, aquellos que cumplen con la producción de agua para cada proyecto son los modelos SW-24K-2380, SW-32K-2480 y SW-96K-4680, los cuales se encuentran marcados en negrita dentro de las tablas y necesitan 6, 8 y 24 membranas de ósmosis inversa respectivamente.

3.1.2. Modelos de membranas del mercado

Tal como se menciona en la ficha técnica de los equipos de desalinización industrial de la empresa Pure Aqua Inc., las membranas utilizadas son en espiral y están constituidas a partir de una o más capas de membranas enrolladas alrededor de un tubo central perforado. El permeado pasa a través de estas membranas hacia el tubo central, tal como se aprecia en la Figura 15.

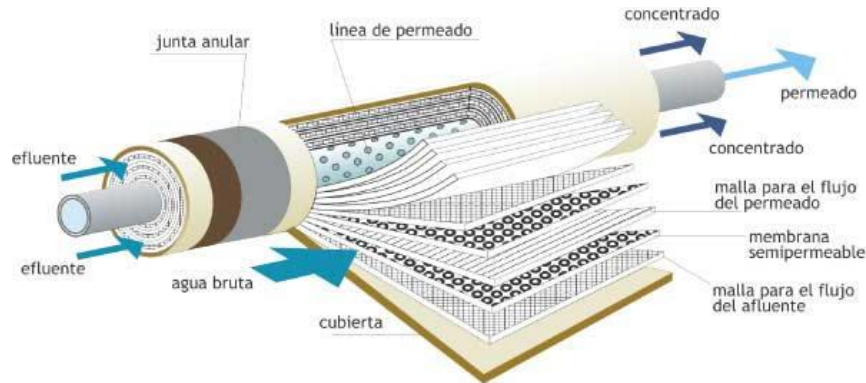


Figura 15: Partes constructivas de una membrana de ósmosis inversa. **Fuente:** VERLEK INGENIERÍA SAS. (s.f.)

Existen varias marcas, tamaños y modelos disponibles de membranas en la página de Pure Aqua que son compatibles con los sistemas mencionados. En la Tabla 15 se muestra un resumen de algunos modelos con los que trabaja la empresa y a continuación se presentan algunas características en común:

- Tamaño: 8" x 40"
- Área: 365, 400 & 449 ft²
- Temperatura máxima: 113°F (45°C)
- Presión máxima: 1200 psig (83 bar)
- Máxima caída de presión: 15 psig (1.0 bar)
- Rechazos: Sal estabilizada (99,8%)
- Rango PH, operación continua: 2-11

- Rango PH, limpieza a corto plazo (30 min): 1-3
- Tolerancia cloro libre < 0,1 ppm
- Rechazo alto:
 - SW30HRLE (6700-8000 GPD)
 - SWC4
- Menor uso de energía:
 - SW30XLE (9000-9900 GPD)
 - SWC6

Tabla 15: Membranas de ósmosis inversa de 8 pulgadas para agua de mar

Marca	Modelos	Área activa (m2)	Tasa de Flujo de permeado (m3/día)	Flujo máximo de alimentación (m3/h)	Precio unitario de referencia	
					[USD \$]	[Ch \$]
Dupont / Dow	SW30HRLE-370/34i	34,4	25	-	888,81	713.314,47
FilmTec	SW30XLE-400i	37	28	-	829,99	659.219,56
Hydronautics	SWC4-LD	40,8	24,6	17	759,00	602.835,75
	SWC6-MAX	40,8	25-50	17	845,99	671.927,56

Fuente: Pure Aqua Inc. (2023) y Big Brand Water Filter Inc. (2023).

Según la cotización realizada en la empresa chilena Simtech, el precio de referencia de una membrana de OI de 8x40” es de \$545.900 + IVA, por lo que queda en un costo de \$649.621, lo que concuerda con el rango de valores ofrecidos en la página Big Brand Water Filter Inc.

Además del sistema de osmosis inversa se debe tener en consideración un sistema de ultrafiltración y nanofiltración capaces de realizar el pretratamiento de osmosis inversa que preserve la efectividad de las membranas de este tipo de tratamiento. En las Tablas 16 y 17 se presentan los modelos disponibles de la empresa Pure Aqua Inc.

Tabla 16: Sistemas industriales de ultrafiltración

Número de modelo	Capacidad - Agua Superficial a 25 GFD		Capacidad - Agua de Mar a 35 GFD		Capacidad - Agua Subterránea a 53 GFD		Cantidad de Módulos de Ultrafiltración
	GPD	M3/ Día	GPD	M3/ Día	GPD	M3/ Día	
UF-10K-1	10080	38	15840	60	25920	98	1
UF-20K-2	20160	76	30956	117	50655	192	2
UF-40K-4	40320	153	63541	241	103976	394	4
UF-60K-6	60480	229	94497	358	154631	586	6
UF-80K-8	80640	305	127082	481	207952	788	8
UF-100K-10	100800	382	158038	599	258608	980	10
UF-120K-12	120960	458	190623	722	311929	1,182	12
UF-161K-16	161280	611	254164	963	415905	1,575	16
UF-201K-20	201600	764	316076	1,197	517215	1,959	20
UF-262K-26	262080	993	412202	1,561	674512	2,555	26
UF-302K-30	302400	1,145	475743	1,802	778489	2,949	30
UF-403K-40	403200	1,527	633781	2,401	1037096	3,928	40

Fuente: Pure Aqua Inc. (2023)

Tabla 17: Sistemas industriales de nanofiltración

Número de Modelo	Caudal de Permeado		Cantidad de Membranas de 8"	Motor 1,000 ppm 60Hz (hp)	Peso Aproximado (libras)	Dimensiones L" x A" x A"
	GPD	M3/Día				
NF-190K-4780	190	719	28	25	4,5	350x72x80
NF-213K-5680	213,75	809	30	25	4,5	300x72x80
NF-256K-6680	256,5	971	36	25	4,9	300x72x80
NF-304K-7680	304	1,151	42	30	5,2	300x72x90
NF-342K-8680	342	1,294	48	30	5,75	300x72x90
NF-389K-9680	389,5	1,474	54	40	6,25	300x72x90
NF-427K-10680	427,5	1,618	60	40	7,5	300x72x90
NF-475K-11680	475	1,798	66	50	8,5	300x72x80
NF-522K-11780	522,5	1,978	77	50	8,75	350x72x90
NF-570K-13780	570	2,157	91	60	9,25	350x84x92
NF-665K-14780	665	2,517	98	60	9,65	350x84x94
NF-760K-16780	760	2,877	112	75	10,2	350x84x96
NF-855K-18780	855	3,236	126	75	10,65	350x84x98

Fuente: Pure Aqua Inc. (2023)

En la Tabla 16 se aprecian sistemas que utilizan desde 1 hasta 40 unidades de ultrafiltración, sin embargo, las medidas de las membranas son diferentes a las utilizadas en los sistemas de ósmosis inversa, pues las membranas de UF de mayor diámetro son de 8 pulgadas, pero el mínimo largo es de 60 pulgadas, versus las 40 pulgadas de OI. A continuación, se presenta la Tabla 18 con los modelos disponibles de membranas de UF.

. Tabla 18: Modelo de membranas de ultrafiltración DOW Filmtec

Modelo	Tipo	Número de Pieza	Zona de Membrana		Volumen del Módulo		Peso (vacía/lleño de agua)	
			m ²	ft ²	Litros	Galones	kg	lbs
SFD-2660	NSF/ANSI 61 Agua Potable	324166	33	355	16	4.2	25/41	55/90
SFD-2860	NSF/ANSI 61 Agua Potable	324168	51	549	35	9.3	48/83	106/183
SFD-2880	NSF/ANSI 61 Agua Potable	324169	77	829	39	10.3	61/100	135/220
SFD-2660	NSF/ANSI 61 Agua Potable	324166	33	355	16	4.2	25/41	55/90
SFP-2860	Tratamiento Previo	280933	51	549	35	9.3	48/83	106/183
SFP-2880	Tratamiento Previo	280934	77	829	39	10.3	61/100	135/220

Fuente: Pure Aqua Inc. (2023)

En el caso de las membranas de nanofiltración, existen modelos de 4x40 pulgadas para los sistemas comerciales mientras que para los sistemas industriales son de 8x40 pulgadas, las cuales son enrolladas en espiral TFC, por lo que su tamaño coincide con las membranas de OI. En el caso de DOW Filmtec existen características correspondientes a sus límites de operación en común para sus membranas, las que se detallan a continuación:

- Rechazo sal estabilizada: >97%
- Lamina fina de poliamida
- Temperatura máxima: 45°C
- Presión máxima: 600psi (41 bar)
- PH operación continua: 3-10
- PH limpieza (30 min): 1-13
- Tolerancia cloro libre < 0.1 ppm

En cuanto a las membranas de la marca Hydranautics, las especificaciones

- Membrana de Polímero: Poliamida Compuesta
- Rechazo de CaCl₂ (mínimo/máximo): 86%/95%

- Tolerancia cloro libre < 0.1 ppm
- Presión máxima: 600psi (41 bar)
- PH limpieza (30 min): 1-12

Tabla 19: Modelo de membranas de nanofiltración DOW Filmtec

Marca	Modelos	Área activa (m ²)	Tasa de Flujo de permeado (m ³ /día)	Flujo máximo de alimentación (m ³ /h)	Precio unitario de referencia	
					[USD \$]	[Ch \$]
Dupont / Dow FilmTec	NF270-400/34i	37	47	15,9	999,91	802.477,77
	NF90-400/34i	37	38	-	888,81	713.314,47
Hydranautics	ESNA1-LF-LD	37,1	31	17	731,40	586.985,07
	ESNA1-LF2-LD	37,1	39,7	17	731,40	586.985,07

Fuente: Pure Aqua Inc. (2023) y Big Brand Water Filter Inc. (2023).

3.1.3. Reutilización de membranas de ósmosis inversa y sus materiales

3.1.3.1. Autopsias de membranas de ósmosis inversa

Antes elegir una opción de reutilización de membranas se pueden realizar pruebas de laboratorio conocidas como autopsias para conocer el estado de estas, sin embargo, dichas pruebas son destructivas ya que la metodología generalmente consiste en el desarme y corte de algunas secciones. Una vez conocido el problema que tiene la membrana se puede saber si es o no reversible, en el caso de que sea reversible la opción más viable es realizar un lavado de las membranas utilizando químicos adecuados, pero si es irreversible se puede optar por un decapado degradando la membrana de OI para convertirla en una de UF o NF alargando su vida útil en otros tratamientos. A continuación, se muestran ejemplos de autopsias en que se visualizan los principales tipos de daños en membranas y cómo se efectúan.

Según lo presentado por Pisano (2022), existen tres causas principales de fallos irreversibles en membranas de OI: caudales (pérdida de carga y malas prácticas), daño físico en la

superficie de la membrana y el daño químico.

- **Daños en tapas antitelescopio:** son aquellas tapas utilizadas en los extremos de las membranas y que mantienen el orden de estas. Los daños de este tipo son bastante comunes y está relacionado principalmente al transporte y manipulación del módulo como, por ejemplo, golpes en las membranas para sacarlas de los racks que las sujetan o golpes por caídas al suelo. En general, esto no afecta la producción de la membrana ni la retención de sales (Ver Figura 16).



Figura 16: Tapa antitelescopio dañada. **Fuente:** Pisano, F. y Grupo Pentalia (2022).

- **Daños en el tubo de permeado:** pueden ser grietas formadas por malos movimientos al acomodar las membranas o deformaciones tras el uso de altas temperatura, lo que conlleva a la comunicación del agua de alimentación con el permeado. Este tipo de daño es irreversible (Ver Figura 17).



Figura 17: Daños en el tubo de permeado de OI. **Fuente:** Pisano, F. y Grupo Pentalia (2022).

- **Daño en carcasa externa:** en general ocurre debido a sobrepresión en el caudal cuando una planta trabaja a una pérdida de carga elevada, lo que en ocasiones genera daño en los sobres de las membranas si es que el daño de la carcasa es significativo y podría provocar ensuciamiento entre la carcasa externa y la membrana. Cabe destacar que las fisuras en la carcasa externa ocurren en el 20% de los casos. Al igual que en el caso de las tapas antitelescopio, este caso es algo en general estético, ya que las grietas en la carcasa normalmente no afectan la retención de sales (Ver Figura 18).



Figura 18: Daños en la carcasa de una membrana de OI. **Fuente:** Pisano, F. y Grupo Pentalia (2022).

- **Efecto telescopio:** es causado por caudales o por una operación con alta pérdida de carga (mayor a 4 o 5 bar por cada capa) y dependiendo de la gravedad puede afectar el rechazo de sales. En este caso las hojas de la membrana se desplazan produciendo abrasión (Ver Figura 19).



Figura 19: Efecto telescopio en una membrana de OI. **Fuente:** Pisano, F. y Grupo Pentalia (2022).

- **Desplazamientos del material espaciador:** está relacionado con el incremento en la variación de presiones y el ensuciamiento en el material espaciador. Este hecho ocurre en un 16% de los casos que se analizan en laboratorio (Ver figura 20).



Figura 20: Desplazamiento del material espaciador en una membrana de OI. **Fuente:** Pisano, F. y Grupo Pentalia (2022).

- **Partículas y depósitos en alimentación:** en la mayoría de los casos aparecen por fallos en la limpieza de los tratamientos. Si las partículas, plásticos o resinas son grandes pueden provocar el fenómeno de Channelling, en donde por unos espacios pasa más agua que por otros, en este caso, la suciedad se acumula en donde corre menos agua dado que la turbulencia es menor. Este suceso podría provocar el desplazamiento del material espaciador o abrasión en la superficie de la membrana. Dependiendo del estado de la membrana el ensuciamiento podría ser reversible. Este suceso representa el 23 % de los casos que se analizan por autopsia. (Ver Figura 21).



Figura 21: Partículas y depósitos en una membrana de OI. **Fuente:** Pisano, F. y Grupo Pentalia (2022).

- **Arrugas y pliegues:** se generan por la operación tras el tiempo de uso, esto no se ha encontrado en membranas nuevas y no afecta en lo particular a la retención de sales (Ver Figura 22).



Figura 22: Arrugas y pliegues en una membrana de OI. **Fuente:** Pisano, F. y Grupo Pentalia (2022).

- **Daño en la superficie de la membrana:** puede ocurrir por alta pérdida de carga o por exceso de caudal. También puede ser que haya una presión del material espaciador (material que separa los sobres y que permite generar las turbulencias para que la planta funcione bien) sobre la membrana dejando marcas visibles con microscopio óptico. En los lugares donde se tienen estas marcas hay un paso de sales mayor porque la poliamida es extremadamente fina, dado que la profundidad de los daños tiene un orden de 14 micras (0,014 mm) (Ver Figura 23).



Figura 23: Vista microscópica del daño en la superficie de una membrana de OI provocado por el material espaciador. **Fuente:** Pisano, F. y Grupo Pentalia (2022).

- **Delaminación en capa de poliamida:** es un suceso irreversible que se detecta en el extremo del rechazo, corresponde a burbujas que se encuentran en la poliamida que llegan a generar montañas de 100 micras (0,1 mm) y puede ocurrir por haber lavado la membrana con el puerto de permeado cerrado o porque cuando la planta se detiene, recibe alta presión por el tubo de permeado, normalmente porque la tubería de permeado está conectado a un tanque elevado y se recibe una contrapresión suficiente para dañar la membrana (Ver Figura 24).



Figura 24: Delaminación de capa de poliamida de una membrana de OI. **Fuente:** Pisano, F. y Grupo Pentalia (2022).

- **Daños por ensuciamiento e incrustación:** estos casos pueden o no ser irreversibles, ya que, si la membrana está dañada por una oxidación, abrasión o la misma incrustación, no se podrá generar la retención de sales. En algunos casos se generan compactaciones del depósito por incrustación masiva y daños severos en la superficie de la membrana por sílice (Ver Figura 25).



Figura 25: Incrustación en una membrana de OI. **Fuente:** Pisano, F. y Grupo Pentalia. (2022).

3.1.3.2. Lavado de membranas

En general la reutilización de membranas de OI que se encuentran dentro de su tiempo de vida útil se asocia a una limpieza a través de un lavado que funciona con un sistema de purificación adaptado. Es necesario considerar que no todas las membranas se incrustan lo mismo, puede variar entre durezas como sílice, biopelículas o partículas con minerales, todo depende del tipo de agua tratada. Entre las principales señales de que se debe lavar una membrana se encuentran: una disminución en el flujo de permeado de un 10 a 15%, un aumento en el diferencial de presión de 10 a 15% (calculado de la presión en el flujo de alimentación menos la presión en el flujo de rechazo), una disminución en el rechazo de sales entre 1 y 2% (calculado con los flujos de alimentación y permeado, y con la concentración de sales totales disueltas en ambos), por otra parte, el ensuciamiento de las membranas puede deberse a carbonatos, sulfatos y/o silicatos, óxidos

metálicos de hierro, manganeso, aluminio, materia orgánica y materia biológica (bacterias, moho, hongos, entre otros.) y por lo tanto, la frecuencia recomendada de limpieza para una membrana de OI es entre 3 y 12 meses (Carbotecnia, 2019).

Según lo mencionado por el equipo de la empresa Oasis Exprés (2023), dedicada a la limpieza de membranas, los sistemas de limpieza funcionan con un rack de fibra de vidrio o acero inoxidable para ubicar las membranas ya sea en serie o paralelo, siendo esta última configuración la manera más eficiente al permitir un lavado simultáneo y en menos tiempo, dado que si una membrana se encuentra tapada no impide la limpieza de las demás, por otra parte, se utiliza una bomba tipo cañón encargada de impulsar el agua a través de las membranas y un depósito en el que se vierten los químicos utilizados para el tratamiento. Este tipo de equipo permite realizar pruebas de diagnóstico con cada membrana para conocer el nivel de ensuciamiento, poniéndolas a trabajar como si fuese un caso normal y midiendo el flujo de permeado, flujo de rechazo, presión de operación, retención de sólidos disueltos y el nivel de TDS (Total de Sólidos Disueltos) en el agua de permeado, esto se hace antes y después del lavado con la finalidad de comprobar el estado final de la membrana. También es importante conocer la máxima temperatura del líquido que soporta la membrana, pues un aumento de temperatura en los químicos de limpieza puede facilitar el proceso, pero un exceso puede dañar permanentemente a la membrana. Cabe destacar que un lavado no garantiza que la membrana se recupere al 100% de su capacidad original, la mayoría de las veces se mejorará la producción en un 80% pero en caso de que una membrana esté muy dañada hay probabilidad de que el lavado no tenga efecto. En la Figura 26 se aprecia la diferencia entre una membrana antes y después del lavado.

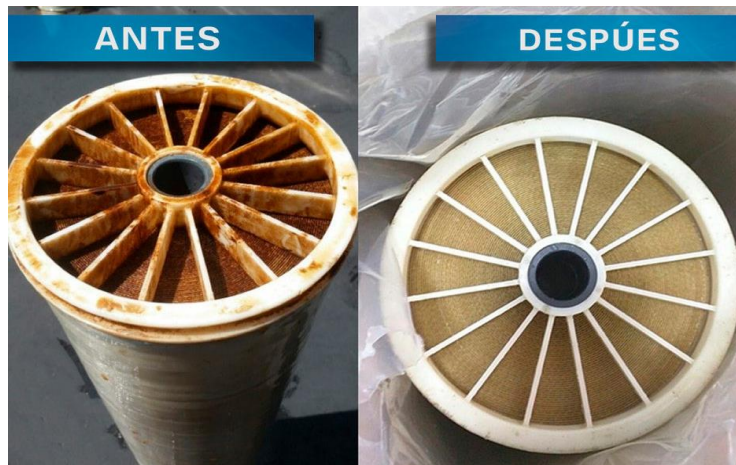


Figura 26: Comparación de una membrana de ósmosis inversa de 4x40 pulgadas antes y después de un lavado. **Fuente:** Oasis Exprés, 2023.



Figura 27: Corte de una membrana desechada de ósmosis inversa de 4x40 pulgadas. **Fuente:** Oasis Exprés, 2023.

En la Figura 27 se aprecia una membrana usada, que ha sido cortada para fines educativos, en donde se aprecian las múltiples capas internas enrolladas por donde pasa el agua a presión. La membrana se encuentra sellada por ambos extremos con unas tapas plásticas que impiden la salida del agua, además de una corteza externa de fibra de vidrio, por lo que la única forma de que el agua salga es atravesando cada capa hasta llegar a los orificios del tubo central (línea de permeado). En la Figura 28 se aprecia una membrana ubicada en un rack de acero inoxidable, con un tubo

PVC que transporta el agua con los químicos de limpieza a través de las membranas, mientras que la zona central de la entrada se encuentra tapada para impedir el escape del flujo de permeado que debe salir por el otro extremo.



Figura 28: Membrana de ósmosis inversa de 4x40 pulgadas situada en rack de sistema de lavado.

Fuente: Oasis Exprés, 2023.

El tiempo de lavado dura aproximadamente 40 minutos, 30 de estos en donde se aplica un químico y los otros 10 restantes son para el enjuague. En general se utilizan 250 gr de un químico en específico (Sílice, Biopelículas y Minerales), por cada membrana, al que debe añadirse 20 litros de agua purificada (membranas de 4x40”) u 80 litros (membranas de 8x40”) para evitar el paso de cloro que podría dañar la membrana (Oasis Exprés,2019). También deben considerarse la compatibilidad de los limpiadores con los materiales de fabricación de las membranas, tener cuidado con los rangos de pH soportados, no mezclar soluciones ácidas con cáusticas, evitar flujos mayores a 40 gpm (membranas de 8x40”) y de 10 gpm (membranas de 4x40”).

3.2. Economía circular de las membranas de OI

Durante el transcurso de la historia se han seguido patrones caracterizados por la producción, el uso y el desecho de bienes a partir de recursos naturales. Este ha sido también el caso de las membranas, las cuales se descartan cuando ya no cumplen con los estándares de caudal y calidad del agua requeridos para los procesos industriales. No obstante, la creciente conciencia ambiental ha impulsado la búsqueda de soluciones para reducir la contaminación generada por estos residuos, especialmente ante el aumento proyectado de la demanda de plantas desaladoras y de hidrógeno verde.

La economía circular busca que los materiales y la energía que se emplean en los productos conserven su valor el mayor tiempo posible, reduciendo al mínimo los desechos y el consumo de recursos. Para lograrlo, se debe intervenir en todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la obtención de las materias primas, el diseño ecológico del producto, hasta el tratamiento de los residuos. En el caso de las membranas, se trabaja constantemente para prolongar su vida útil dentro de la cadena de valor de sus procesos (García, 2017).

Entre algunas acciones realizadas hoy en día en apoyo a la economía circular (Ver Figura 29), se encuentran: la fabricación de nuevos materiales para membranas que mejoren el rendimiento de los procesos, la aplicación de procesos integrados de pretratamiento y limpieza con mayor eficiencia y el desarrollo de un reciclaje innovador de las membranas García (2017).

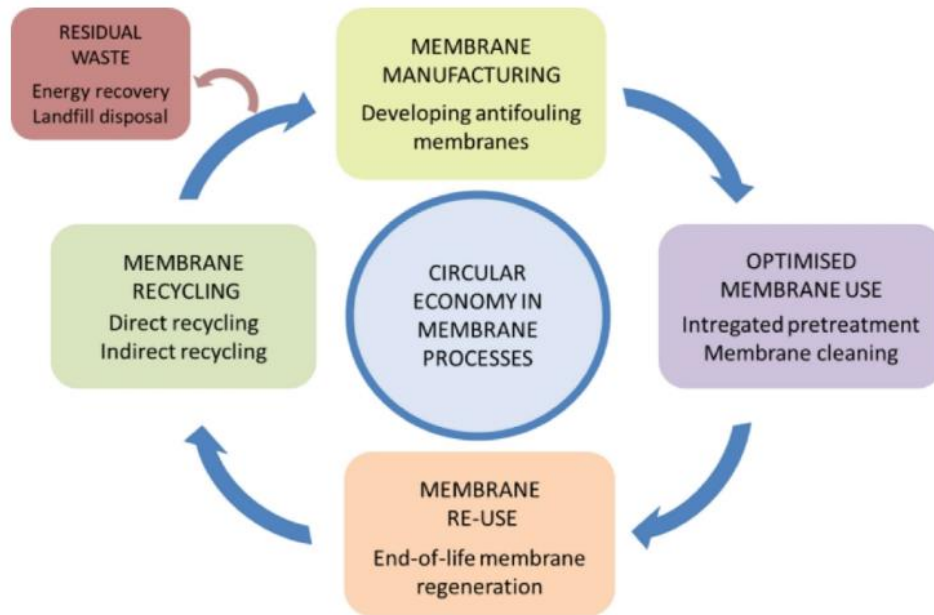


Figura 29: Hacia una economía circular en membranas utilizadas en desalinización. **Fuente:** Landaburu, J., et al., 2016.

3.2.1. Gestión del final de la vida útil de las membranas de OI

Las membranas se ensucian inevitablemente y, cuando dejan de cumplir las funciones para las que fueron diseñadas, se convierten en un residuo que termina en su mayoría en vertederos. Esto ha motivado la búsqueda de otras formas de gestión alternativas que permitan aprovechar al máximo el rendimiento de las membranas y reducir el impacto ambiental que causan sus desechos (Ver Figura 30) (García, 2017).

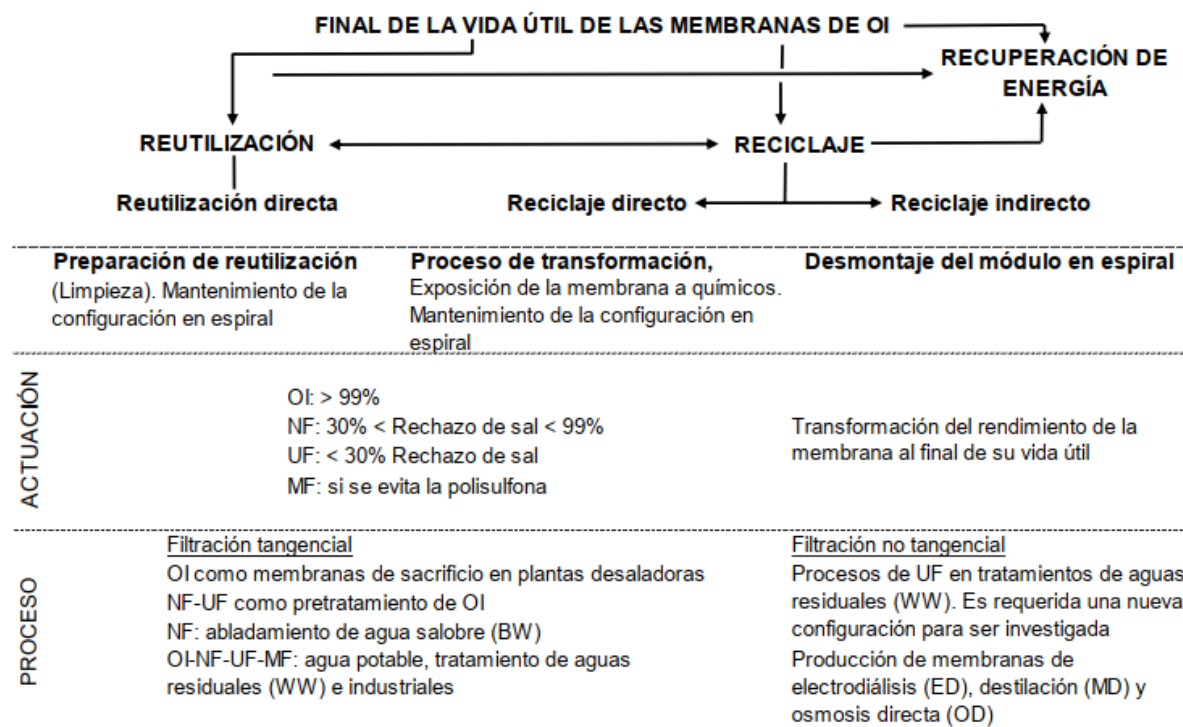


Figura 30: Alternativas para el final de la vida útil de las membranas de OI. **Fuente:** García, R., 2017.

Reutilización: se refiere a las operaciones de verificación, limpieza o reparación, mediante las cuales los productos o componentes de estos, que se han convertido en desechos se preparan para reutilizarse sin ningún otro procesamiento previo (Council, 2008).

Reciclaje indirecto: los componentes plásticos de las membranas pueden ser reciclados por métodos mecánicos o químicos, y debe considerarse su idoneidad potencial para el reciclaje mecánico, bajo la suposición de que se puedan separar de manera exitosa y económica. Por otra parte, el reciclaje químico logra descomponer el material plástico mediante despolimerización y degradación, siendo más costoso que el reciclaje mecánico, pero con la ventaja de que puede procesar polímeros heterogéneos con limitados tratamientos. Ambos procesos se suelen aplicar en materiales contaminados, por lo que se recomienda realizar una evaluación del estado de los componentes de la membrana para validar las oportunidades de reciclaje (Lawler, 2012).

La alternativa de reciclaje indirecto sirve para las membranas al final de su vida útil que no pueden reciclarse directamente realizando una deconstrucción del módulo ya que las membranas suelen estar hechas de diversos materiales poliméricos. Por ejemplo, las membranas de OI están compuestas de películas finas que incluyen una capa densa de PA aromática soportada por una capa interna de polisulfona micro porosa y una malla de poliéster no tejido (PET). Además, los espaciadores de alimentación y de permeado están hechos de polipropileno (PP) y PET respectivamente. Los tubos de permeado y tapas de los extremos, están contruidos de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y la carcasa exterior se compone de fibra de vidrio, el resto de los materiales contienen componentes de tipo epoxi. Considerando lo anterior, cada uno de los materiales podría extraerse y ser reciclados (mecánicamente) (García, R., 2017).

Reciclaje directo: la técnica se basa en el tratamiento oxidativo de las membranas TFC para eliminar su capa densa de PA dejando expuesta la membrana de soporte de polisulfona (Coutinho de Paula, E., 2018). El método mencionado no interfiere en la estructura del módulo y es el más común para el reciclaje de membranas de OI. Al degradar la capa de PA aumenta la permeabilidad de la membrana y al mismo tiempo el coeficiente de rechazo de sal disminuye. En la literatura se proponen un sistema de transformación pasivo y uno activo. El primero solo requiere la inmersión de las membranas en un depósito que contiene el agente oxidante, mientras que el segundo dispone de la membrana al interior de un tubo a presión, al cual se le hace circular el agente oxidante (García, 2017)

El proyecto europeo Life + Transfomem, que finalizó el año 2018, demuestra la viabilidad de transformar membranas al final de su vida útil en membranas de nanofiltración y ultrafiltración, a escala piloto. El principal desafío es lograr que las propiedades de las membranas recicladas compitan con las membranas comerciales en cuanto a costo, efectividad, durabilidad y

mantenimiento (García, et al., 2016).

Entre algunas de las opciones de reciclaje indirecto y directo para las partes que componen las membranas mencionadas en el estudio de García (2017), se encuentran las siguientes:

- 1) **Espaciador de permeado PET y tubo de permeado ABS:** son los candidatos más probables al ser reciclados, dado que solo se encuentran en contacto con agua limpia. El PET generalmente se recicla para la fabricación de envases de bebida.
- 2) **Láminas y espaciador de alimentación de polipropileno:** debido al alto nivel de suciedad, necesitaría una limpieza exhaustiva. Sin embargo, una posible reutilización directa es como geotextiles en jardines domésticos bajo una capa de grava para mantener la posición de rocas decorativas y eliminar el crecimiento de hierbas malas. Otra opción para los separadores es utilizarlos como redes para pájaros, cortavientos o redes para proteger el césped.
- 3) **Espaciadores de alimentación y tapones ABS:** se puede utilizar para el tratamiento de aguas residuales como material de relleno del filtro percolador convencional, para promover el crecimiento microbiológico.
- 4) **Carcasa de fibra de vidrio:** conversión a materiales termoestables mediante reciclado físico-mecánico.

Otras alternativas del reciclaje indirecto abarcan desde tejidos exóticos y decoración de ropa, hasta el uso como material agregado en hormigón compuesto y rellenos de madera.

Recuperación de energía: las membranas están constituidas de polímeros sintéticos, a excepción de la carcasa de fibra de vidrio, y el contenido de carbono de los polímeros oscila entre el 60% y 90%. Por lo tanto, se espera que un elemento de membrana de OI de 8” con 13,5 kg contenga aproximadamente 9,1 kg de carbón. Por esta razón, existe la alternativa de conversión de

residuos sólidos con liberación de energía térmica controlada, mediante los tratamientos tradicionales de incineración, pirólisis o gasificación (combustión parcial con aire limitado para producir gas de síntesis). En este sentido, si bien la incineración puede reducir el volumen de sólidos plásticos entre un 90% y 99%, el tratamiento mediante pirólisis con el uso de gasificación de plásticos presenta una ventaja en la reducción de emisiones atmosféricas y obtención de un producto combustible utilizable (García, 2017).

En el estudio de Lawler (2015), se utiliza un módulo de membrana de OI estándar de 8” como unidad funcional comparando las opciones al final de su vida útil, en donde se incluyen la incineración, conversión en gas de síntesis, el uso como sustituto del coque (combustible sólido) en la fabricación de acero EAF (Electric Arc Furnace), el reciclado de materiales, la reutilización directa y la conversión química en membranas de UF y su reutilización. En la Figura 31, se puede ver el impacto equivalente de la fabricación de los diferentes componentes del módulo, en donde se incluyen nueve categorías en relación con el cambio climático, agotamiento de recursos salud humana y toxicidad, y la contaminación atmosférica. En la Figura 32 se puede ver el impacto de las opciones en relación con el impacto de la fabricación del módulo, en donde, por ejemplo, un impacto del -100% significaría una compensación completa de la producción del módulo. Las unidades utilizadas son emisiones equivalentes de dióxido de carbono ($CO_2 - e$), y consumo equivalente de petróleo (oil-e) con la finalidad de reflejar el potencial de cambio climático y agotamiento de recursos no renovables (García, 2017).

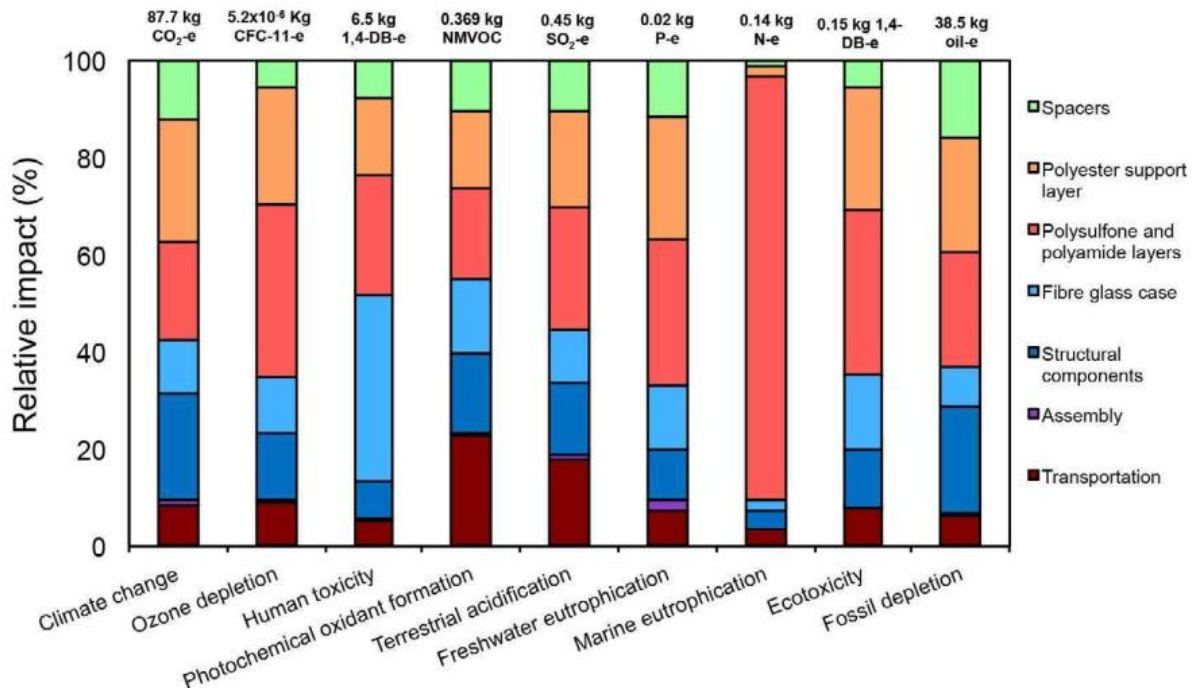


Figura 31: Impacto relativo de los distintos componentes durante la fabricación de un módulo de ósmosis inversa. Los valores sobre las barras son las emisiones totales de la categoría de impacto.

Fuente: Lawler, W., et al. 2015.

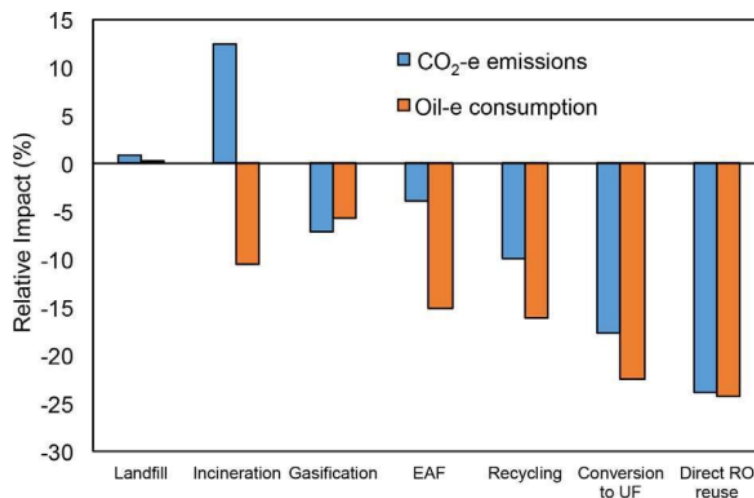


Figura 32: Emisiones de gases de efecto invernadero y agotamiento de recursos para la eliminación de un elemento de membrana de ósmosis inversa. Los resultados se muestran en términos de compensación relativa de la producción de membranas. **Fuente:** Lawler, W., et al. 2015.

Mediante el uso de una herramienta en línea llamada MemEOL, es posible reunir la información histórica de viabilidad financiera, impacto medioambiental y viabilidad técnica. Esta herramienta se basa en un sistema discreto de análisis de decisiones multicriterio (MCDA), siendo un potente método para el modelado y resolución de problemas con múltiples entradas, en donde los criterios medidos están en unidades y se puede utilizar información tanto cuantitativa como cualitativa. La Figura 33, muestra los resultados del modelo a fin de comparar las opciones al final de la vida útil de las membranas de OI (García, R., 2017).

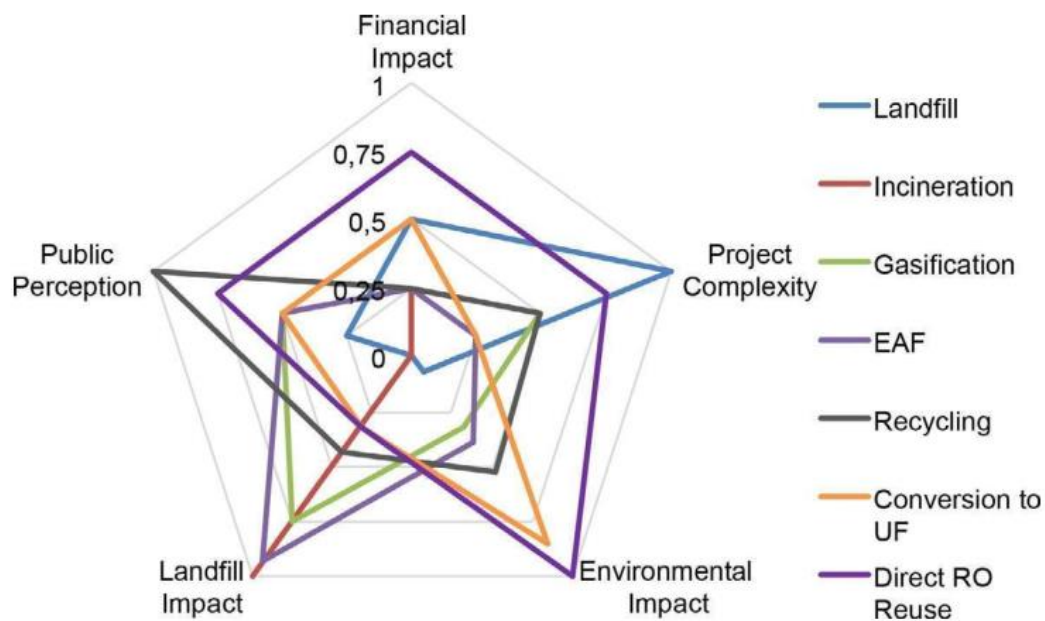


Figura 33: Puntuación relativa de la evaluación de los escenarios de final de vida: (0) menos favorable a (1) más favorable. **Fuente:** Modificado de Lawler, W., et al. 2015.

A partir de la Figura 33, se observa que la reutilización directa de las membranas de OI es muy favorable en cuanto a impacto ambiental, percepción pública, impacto financiero y la complejidad de llevar a cabo el proceso. Por otra parte, la reutilización directa es preferida a la conversión de membranas de UF en todos los aspectos, lo que indica que este proceso solo se toma

en consideración cuando la reutilización directa de las membranas no es factible. En caso de que, ninguna de las alternativas anteriores se pueda llevar a cabo, existen las alternativas restantes, en donde la incineración es la peor alternativa, pero a su vez más favorable para reducir el volumen en vertederos y el envío a vertederos es la opción más sencilla pero menos favorable en el resto de los criterios.

3.2.2. Transformación de membranas

Tal como se menciona anteriormente, uno de los tratamientos aplicados al momento en que se acaba la vida útil de una membrana de OI por algunas de las razones explicadas en las pruebas de autopsia, consiste en realizar una transformación de las membranas de OI que se encuentran al final de su vida útil en membranas de NF y UF mediante la aplicación de agentes oxidantes como el cloro libre, de tal forma que se altere la capa activa de PA. A continuación, se presentan dos estudios relacionados:

Estudio N°1:

En el estudio de Godoy, Mena y Susial (2001), se realiza un tratamiento de aguas residuales en una planta piloto semiindustrial a partir del reúso de membranas industriales de OI, utilizando tres membranas en espiral agotadas (no recuperables) utilizando agentes oxidantes para modificar la película polimérica (Ver Figura 34).

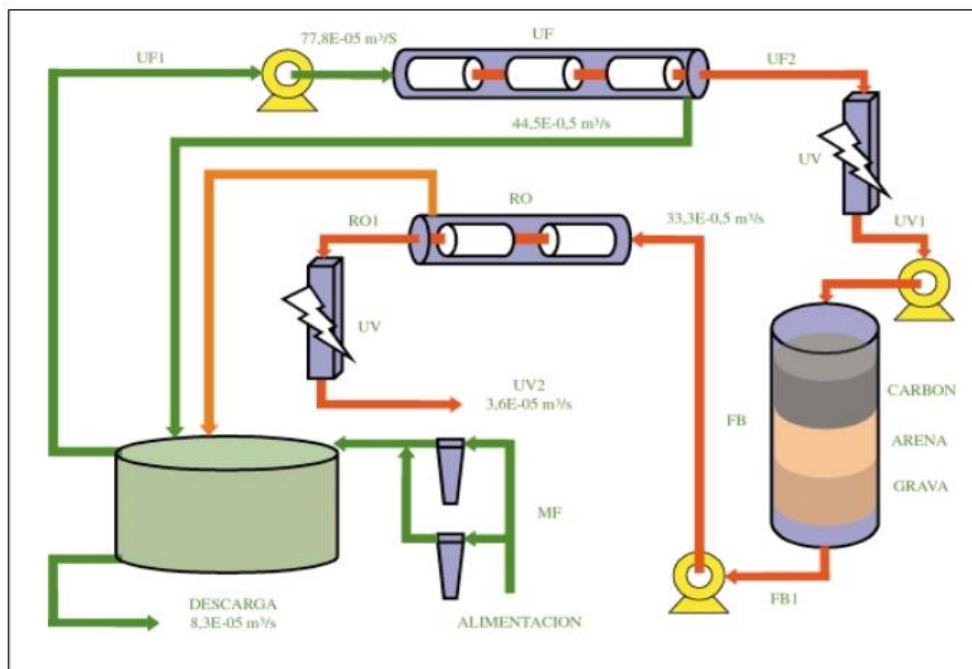


Figura 34: Diagrama de instalación experimental de planta piloto que incluye membranas modificadas. **Fuente:** Godoy, E., Mena, S. y Susial, P. 2001.

Para el tratamiento de las membranas se prueba el uso de ácido nítrico, peróxido de hidrógeno e hipoclorito sódico, con la ventaja de que no se actúa sobre la configuración física inicial exterior. Las membranas utilizadas en la planta piloto son tratadas específicamente con 2.500 ppm de hipoclorito sódico durante 45 días a temperatura aproximada de 293 K, por inmersión en un tanque de 2 m^3 y luego lavadas con agua. Para la prueba y catalogación de las membranas se opera de forma aislada en el tubo de presión haciendo circular diferentes dextranos (polisacárido complejo y ramificado), previamente disueltos en agua desmineralizada ajustando el pH de agua en un rango de 10-12 mediante la adición de NaOH.

La catalogación presentada en la Tabla 21 contiene algunas nomenclaturas que se detallan en la Tabla 20:

Tabla 20: Nomenclatura utilizada en estudio de reutilización de membranas de OI

Sigla	Definición y/o unidad
C_0	Concentración de soluto en la alimentación, [ppm TOC]
C_p	Concentración de soluto en el permeado, [ppm TOC]
TOC	Carbono orgánico total
Q_p	Flujo de permeado, [$m^3 s^{-1}$]
DP	Presión de transmembra ($S P_{ent}/2P_{sal}$), [Pa]
R	Retención, [-]
Conductividad	[mS/cm]
COD	Demanda química de oxígeno [ppm O_2]
TDS	Sólidos disueltos totales [ppm]
TSS	Sólidos totales suspendidos [ppm]
Color	[Unidades]

Fuente: Godoy, E., Mena, S. y Susial, P., 2001.

Tabla 21: Resultados en la catalogación de membranas en espiral modificadas

DP/Pa	$Q_p/m^3/s$	$C_p/ppm\ TOC$	R%
$C_0 = 41,4\ ppm\ TOC\ y\ dextrano\ de\ MWCO\ 500000$			
1,3E+05	9,8E-05	9,9	82
2,4E+05	15,2E-05	11,9	71
3,4E+05	19,2E-05	12,9	69
3,9E+05	21,2E-05	14,5	65
$C_0 = 48,1\ ppm\ TOC\ y\ dextrano\ de\ MWCO\ 267000$			
1,5E+05	15,6E-05	10,9	77
2,6E+05	27,4E-05	12,9	73
3,3E+05	31,0E-05	20,5	57
4,0E+05	38,0E-05	26,3	45
$C_0 = 48,4\ ppm\ TOC\ y\ dextrano\ de\ MWCO\ 68000$			
1,4E+05	13,6E-05	25,3	48
2,4E+05	23,6E-05	33,0	32
3,5E+05	33,6E-05	40,5	17
3,8E+05	34,9E-05	42,8	12
$C_0 = 53,4\ ppm\ TOC\ y\ dextrano\ de\ MWCO\ 17000$			
1,4E+05	15,3E-05	43,6	18
2,4E+05	24,9E-05	46,6	13
3,0E+05	30,1E-05	46,7	13
3,6E+05	34,1E-05	48,2	10

Fuente: Godoy, E., Mena, S. y Susial, P., 2001.

En las pruebas realizadas se utilizan 5 bar para la UF, para FB se usan 2,1 bar y la etapa de OI usa 16 bar, como valores máximos. Al circular un flujo cruzado de $77,8 \text{ E05 } [m^3/s]$ se obtienen los siguientes resultados al comparar la situación inicial y final:

- Situación inicial: membranas de OI rechazan solutos comprendidos entre $0,0001\text{-}0,001 \mu\text{m}$ operando a presiones de 7.000 kPa
- Situación final: membranas reutilizadas de OI rechazan solutos situados en un rango de $0,002\text{-}0,1 \mu\text{m}$, operando a una presión del orden de 700 kPa.

Considerando lo anterior se decide clasificar las membranas como de UF, al rechazar solutos en los rangos que trabaja este tipo de membranas.

Estudio N°2:

El estudio de reciclaje de García (2017), apoyado por el instituto IMDEA Agua y el proyecto europeo LIFE 13 ENV/ES/000751, basado en membranas de nanofiltración y ultrafiltración a partir de membranas de ósmosis inversa que se encuentran fuera de uso, se basa en la caracterización de las membranas mediante técnicas termogravimétricas, espectrométricas y microbiológicas, sometiendo las membranas de OI al ataque de cloro libre para alterar la capa activa de PA mediante la metodología de inmersión pasiva. Para esto se utilizan modelos de 8” de diámetro, las cuales se conservan en bisulfito sódico (500 – 1.000 ppm) y a nivel de laboratorio se extraen cortes de membranas que se conservan en agua Milli-Q ante de su caracterización y evaluación, por otra parte, también se evalúa la conservación de las membranas en seco durante dos meses con el fin de comparar el rendimiento, utilizando agua Milli-Q (5 L) y una solución sintética de agua salobre (5 L) que contiene NaCl (2.000 ppm), MgSO_4 (2.000 ppm) y dextrosa (250 ppm), eligiendo NaCl y MgSO_4 por ser compuestos inorgánicos estándar. Los modelos de membranas utilizadas y sus propiedades se detallan en la Tabla 22.

Tabla 22: Información de membranas para agua de mar enrolladas en espiral utilizadas para experimento en laboratorio y escala

Código	Marca comercial	Modelo	Superficie nominal [m ²]	Caudal de permeado [m ³ /d]	Coefficiente de rechazo de sales %	Tolerancia máxima al cloro [ppm]	Tipo de experimento
SW-0 SW-1	Hydranautics	RO/HSWC3	34	22,3	99,7	<0,01	Laboratorio /Piloto
SW-12	Dow Filmtec	RO/SW30HRLE-440i	41	31,0	99,8	<0,10 ppm	Laboratorio
SW-13	Toray	RO/TM820C-400	37	24,6	99,75	ND	Laboratorio
SW-15	Dow Filmtec	RO/W30XHR-440i	41	25,0	99,82	<0,1	Laboratorio

Fuente: Tabla adaptada de García, R., 2017. Nota: Valores normalizados a 32.000 ppm de NaCl, 55 bar de presión aplicada y 25 °C de temperatura de funcionamiento.

En términos de protocolos de reciclaje, se parte con una escala de laboratorio con cupones de membrana (secciones cortadas) de 216 cm² almacenados en seco y húmedo e hidratados con agua Milli-Q fresca durante 4 horas, luego la membrana se sumerge en la solución de transformación en recipientes plásticos sellados y opacos a una temperatura aproximada de 21 °C sin agitación. El tiempo de exposición depende del objetivo del experimento y finalmente se sacan los cupones de los recipientes y se enjuagan a fondo con agua Milli-Q hasta alcanzar el pH del agua mencionada (García, 2017).

La Tabla 23 presenta las condiciones consideradas, que se utilizan a modo comparativo con el procedimiento realizado.

Tabla 23: Condiciones experimentales comparativas utilizadas a escala de laboratorio

Objetivo principal	Membranas al final de su vida útil	Agente químico	Concentración [ppm]	pH	Tiempo de exposición [h]	Dosis de exposición [ppm-h]
Estudio preliminar de la selección de agente químico	BW-10 (TM720-400) Almacenamiento en seco	Acetona NMP	10000	N/A	0,083	830
					20	200.000
					92	920.000
		Cloro libre (NaClO)	124	10,5	0,083	10.290
					20	2.480
					92	11.400
Selección de la condición de pH	BW-10 (TM720-400) Almacenamiento en seco	Cloro libre (NaClO)	124	3*-7*- 10,5	1	120
					20	2.500
					36	4.500
					50	6.200
					122	15.000
Estudio de reproducibilidad	BW-10 (TM720-400) BW-11 (BW30-400) SW-12 (SW30-HRLE) SW-13 (TM820-400) SW-0 (HSWC3) Almacenamiento húmedo	Cloro libre (NaClO)	124	10,5	1	124
					20	2.500
					36	4.500
					50	6.200
					122	15.000
					242	30.000
Estudio de ppm-h y validación de membrana reciclada	BW-10 (TM720-400) BW-11 (BW30-400) SW-12 (SW30-HRLE) SW-13 (TM820-400) SW-0 (HSWC3) Almacenamiento húmedo	Cloro libre (NaClO)	1240	12	5	6.200
			6200		1	
			12400		0,5	
			124	12	24,2	30.000
			6200		4,84	
			12400		2,42	
			6200	12	48,2	300.000

Fuente: Tabla adaptada de García, R., 2017.

Según lo descrito por García (2017), para realizar los experimentos se utiliza un sistema piloto de reciclado (Ver Figura 35), el cual contiene las siguientes partes:

- 1) Reactor de reciclado pasivo, que contiene una estructura para contener las 6 membranas verticalmente y la cual, a su vez, está sostenida por un contenedor cilíndrico que se llena con las soluciones.
- 2) Bombas de baja presión
- 3) Circuitos de válvulas
- 4) Contenedores de 1 m^3 , que almacenan las soluciones de NaClO y NaHSO₃
- 5) Contenedor de 10 m^3 , utilizado para realizar la neutralización del cloro libre con

bisulfito sódico.



Figura 35: Reactor de reciclado a escala piloto, sistema activo (izquierda), sistema pasivo (centro) y diseño del sistema pasivo(derecha) que contiene 6 membranas en espiral en la estructura. **Fuente:** Valoriza Agua, s.f.

En cuanto al protocolo utilizado en esta prueba piloto, se describe lo siguiente:

- 1) Diluir el NaClO en agua hasta alcanzar una concentración de cloro libre entre 6.000 y 16.000 ppm, esta concentración se fija de acuerdo con la determinación in situ del pH, conductividad y redox, por lo que se debe agregar cuando sea necesario para mantener una concentración constante.
- 2) Preparar solución de bisulfito sódico (NaHSO_3) diluyendo el reactivo comercial (3 mg de NaHSO_3 por 1 mg de cloro libre) con agua y almacenar en un recipiente para productos químicos.
- 3) Colocar 6 membranas sin vida útil en la estructura (Podría ser necesario utilizar un polipasto para facilitar la instalación).
- 4) Transferir solución de NaClO al contenedor de membranas hasta completar $\frac{3}{4}$ del volumen del reactor y luego aplicar una circulación transversal para homogeneizar la solución.
- 5) Una vez que las membranas se encuentran totalmente sumergidas se debe hacer circular

la solución a través de ellas durante 10 minutos para expulsar el aire contenido.

- 6) No se debe aplicar agitación, el proceso debe ser estático y el tipo de exposición varía según el objetivo según el contenido
- 7) La solución de transformación utilizada se debe transferir a otro contenedor químico y se debe rellenar el reactor con una solución de NaHSO₃ con la finalidad de reducir completamente el cloro libre residual de las membranas.
- 8) Finalmente se deben sacar las membranas recicladas del reactor y almacenarlas en una solución de NaHSO₃ hasta evaluar el rendimiento del proceso.

Las condiciones experimentales de exposición al cloro libre se resumen en la Tabla 24.

Tabla 24: *Dosis de exposición al cloro libre utilizadas en el proceso de reciclaje a escala piloto.*

Objetivo de la investigación	Concentración de cloro libre [ppm]	Dosis de exposición estimada [ppm-h]
Validación de la dosis de exposición a escala de laboratorio	7,446 ± 1292	6.200, 12.500, 33.500, 42.000, 46.000
	12,385 ± 3,040	350.000
Efecto de la dosis de exposición prolongada en la UF reciclada, rendimiento y superficie de la membrana	12,385 ± 3,040	600.000, 800.000 1.000.000, 1.700.000

Fuente: *Tabla adaptada de García, R., 2017.*

Como se aprecia en la Tabla 24, hay experimentos realizados en membranas de UF con exposiciones de hasta 1.700.000 ppm-h, debido a que se estudia si la capa polisulfona de las membranas de UF recicladas se daña a exposiciones más largas.

En cuanto a las evaluaciones de rendimiento, estas se prueban varias veces para una misma membrana de tal forma que los coeficientes de permeabilidad se miden una vez que el error relativo de las mediciones es inferior al 5%. Los resultados obtenidos y mencionados por García (2017) son los siguientes:

Identificación de suciedad: En general una membrana enrollada tiene un peso que varía entre 11 kg y 16 kg, dependiendo del número de láminas de la membrana y el tipo de carcasa exterior. En el transcurso de la vida útil de una membrana el peso de estas llega a aumentar entre 1.5 veces (suciedad orgánica o inorgánica) y 3 veces (alto nivel de incrustación).

Análisis termo gravimétrico: la temperatura de descomposición inicial ocurre entre los 175 y 235°C, el ensuciamiento de las membranas SW-0 y SW-12 oscila entre el 66% y 76% de materia orgánica.

Espectrometría de masas con plasma acoplado: las membranas SW presentan diversos metales, en donde el manganeso representa el 30% de suciedad, además de fósforo (P), yodo (I) y sodio (Na), por otra parte, el ensuciamiento inorgánico de la membrana HSWC3 presenta principalmente Si, P, Fe y Al.

Detección y recuento de bacterias: se realiza una estimación de unidades formadoras de colonias (UFC) de bacterias en 1 cm^2 , en el caso de la membrana SW-13 se detectaron concentraciones muy bajas de bacterias coliformes (1-10), por otra parte, tanto en la membrana SW-0, SW-12 y SW-13 se encontraron concentraciones de pseudomonas ($10^2 - 10^3$), bacterias aeróbicas ($10^3 - 10^4$), moldes ($10^4 - 10^5$) y levaduras ($10 - 10^2$).

Según lo expuesto en documento de García (2017), se utilizó la membrana BW-10 (TM720-400) para una gran cantidad de experimentos que permitieran una línea base de resultados, ampliando el estudio a modelos de membranas de agua salobre y agua de mar. En este sentido se seleccionó el NaClO como agente oxidante para la PA y acetona, que desprende la PA de las capas de soporte de la membrana. De acuerdo con los resultados del estudio de reproducibilidad del proceso de transformación, al comparar entre el almacenamiento en seco y en húmedo se obtiene que el primero simula las condiciones actuales en que las membranas son

enviadas al vertedero (a menos peso de membrana más bajo es el costo de transporte), en cambio el almacenamiento húmedo simula la condición ideal para conservar las membranas una vez que finaliza su vida útil y antes del proceso de reciclado. Las membranas secas tienen una permeabilidad media inferior a las de las membranas que se almacenan húmedas y estas últimas a su vez, tienen un coeficiente de rechazo más elevado. Por otra parte, para ampliar el proceso a las membrana enrolladas en espiral se aplica un rango de concentración de 6.000 a 16.000 ppm de solución de cloro libre, probando diferentes los diferentes niveles de exposición utilizados a escala de laboratorio, en donde se observa que los modelos de membrana SW disponibles (HWC3, SW-0 y SW-1) ofrecen resistencia a ataque químico por cloro libre, por lo que se requiere un rango de exposición de 33.000 a 46.000 ppm-h para observar el rendimiento de una membrana de NF y se necesitó una dosis de exposición de alrededor de 350.000 ppm-h para alcanzar coeficientes de rechazo similares a los de UF (Ver Figura 36).

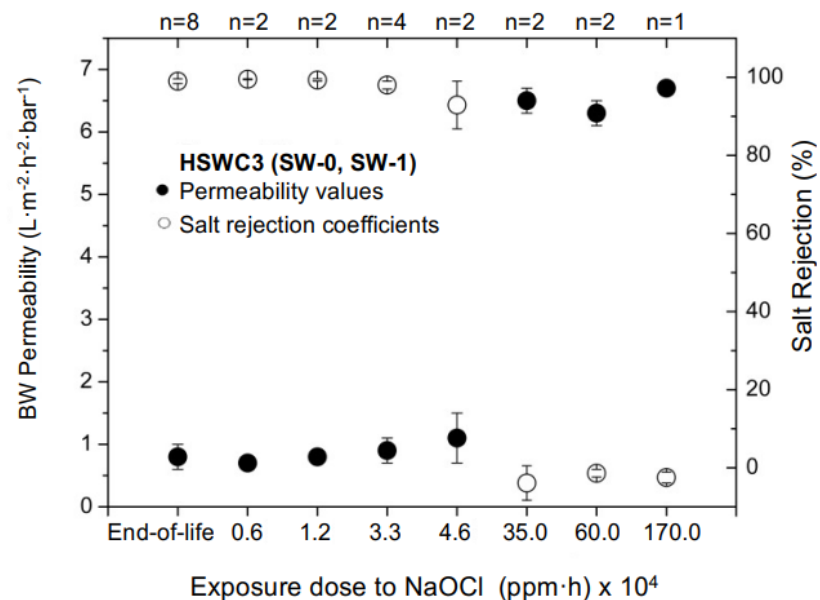


Figura 36: Rendimiento de membranas recicladas expresado en el coeficiente de permeabilidad y rechazo de sales SW-0, SW-1 (HSWC3). **Fuente:** García, R., 2017.

García (2017) menciona que al utilizar el concepto de ppm-h no hay un tiempo de exposición y concentración claros que definan el límite entre el rendimiento comparativo a una membrana de NF o UF, pues los coeficientes de rechazo alcanzados pueden compararse con los de NF (Ver Figura 38), mientras que los valores de permeabilidad están dentro del rango de UF (Ver Figura 37)

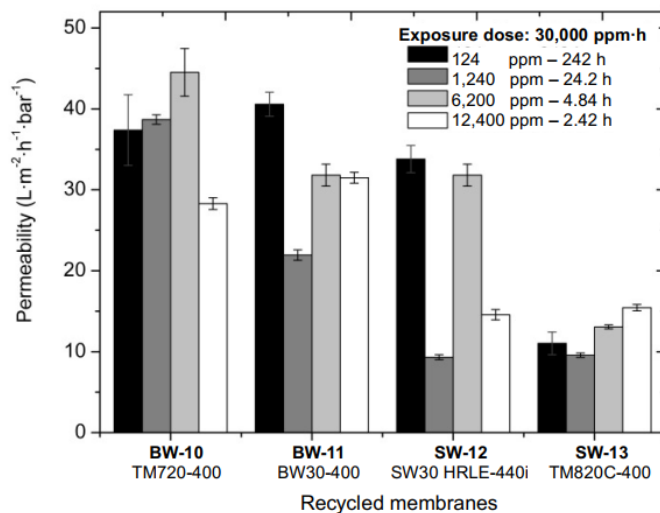


Figura 37: Permeabilidad de la membrana reciclada a una dosis de exposición de 30.000 ppm-h.

Fuente: García, R., 2017.

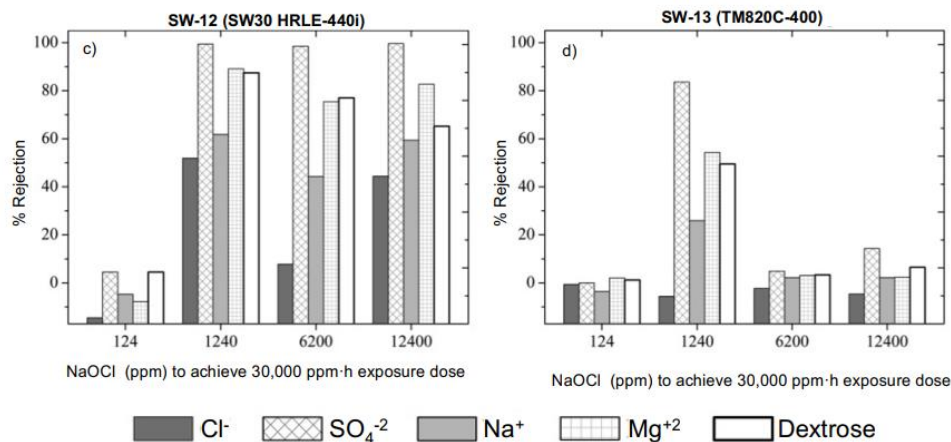


Figura 38: Coeficientes de rechazo de la membrana reciclada a una dosis de exposición de 30.000 ppm-h. **Fuente:** García, R., 2017.

Finalmente se resume las decisiones tomadas para convertir las membranas de OI en membranas de NF y UF y aplicarlas al tratamiento de aguas residuales (Ver Tabla 25).

Tabla 25: Niveles y resultados en la transformación de membranas de OI en NF y UF ante el tratamiento de aguas residuales.

Medida	OI a NF reciclada	OI a UF reciclada
Exposición	4.500 ppm-h	300.000 ppm-h
Permeabilidad	3,5 - 6.5 $L^{-2}h^{-1}bar^{-1}$	15-25 $L^{-2}h^{-1}bar^{-1}$
Rechazo de sales	88% - 95%	>98%
Rechazo iones monovalentes	>80% (Cl^{-} , Na^{+} , K^{+})	-
Rechazo iones polivalentes	>94% (SO_4^{-2} , Mg^{+} , PO_4^{-3})	-
Rechazo total de nitrógeno	>75%	-

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en el estudio de García (2017).

Al año 2017 la empresa WaterSurplus con sede en Estados Unidos parece ser el único proveedor comercial de elementos de membranas de OI, NF y UF de segunda mano, generando ahorros en los usuarios debido a sus precios de venta que rondan entre los 150 y 400 USD (\$120.645 - \$321.720), con lotes de hasta 400 elementos disponibles para su compra. Por otra parte, al año 2016 la empresa había adquirido y reutilizado más de 25.000 membranas (García, 2017).

3.2.3. Equipos y costos de la reutilización de membranas y sus materiales.

Si bien en los estudios mencionados existen tratamientos previos, pruebas de laboratorio y pruebas a escala piloto para la obtención de membranas de ósmosis inversa, no hay costos explícitos asociados directamente a un equipo que permita obtener dichas membranas, por lo tanto, a continuación, se utilizan datos de referencia para generar un valor estimado.

Lavados de membranas:

Al considerar membranas que aún no han terminado su vida útil, es posible realizar lavados, ya sea dentro de la misma planta productora de hidrógeno verde o en una empresa externa. En el caso de considerar una empresa externa, se puede tomar como referencia el precio de lavado

ofrecido por Oasis Exprés, cuyo valor ronda los MXN \$1.890 por membrana de 4x40”, lo que se traduce en CL \$88.592. A pesar de lo anterior, las membranas a las que se enfoca este estudio son aquellas de 8x40”, por lo que se cotiza el valor de una limpieza química en la empresa Simtech, la cual ofrece dicho servicio a un precio de \$180.000 por membrana, pero especifican que la frecuencia de limpieza no tiene un valor estandarizado, sino que, depende del funcionamiento y lo más adecuado es realizar un seguimiento a cada planta, aplicando el método de normalización de datos.

Transformación y reutilización de membranas:

En el documento sobre reciclaje de membranas de ósmosis inversa al final de su vida útil de Senán, J., et al. (2019), se realiza un análisis comparativo y de rentabilidad a escala piloto, en donde se utilizan los reactores de la Figura 35, de donde se obtiene que en todos los casos el sistema pasivo (PS) tiene menores costos que un sistema activo (AS) tal como se muestra en la Figura 39.

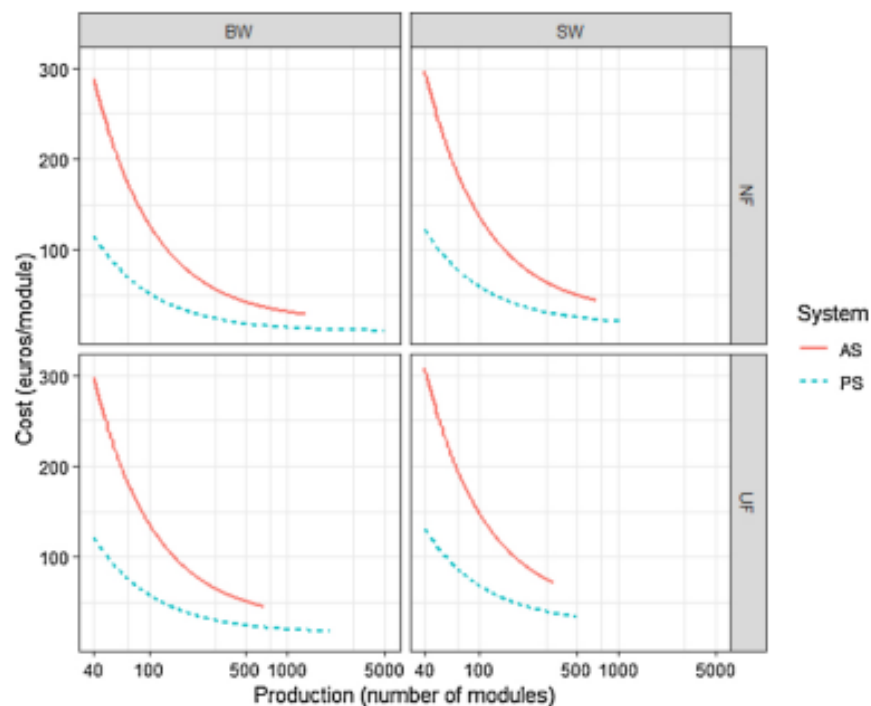


Figura 39: Funciones de costo-efectividad al comparar: i) Sistemas (AS vs PS); ii) Desempeño del

producto (NF y UF). Los límites de línea representan el rango de productividad: [40 – máxima producción anual (módulos por año)]. Fuente: Senán, J., García, R., Landaburu, J. y García, E., 2019.

En el caso de la Figura 40, se analiza la transformación de una misma cantidad de módulos (300 módulos por año). En todos los casos, el PS tiene costos menores, de 25,89 a 41,53 €/módulo (\$22.620 – \$36.286 aproximadamente) frente al sistema AS con costos entre los 54,49 y 73,35 €/módulo (\$47.619 – \$64.089 aproximadamente). Esto se debe a que el CAPEX y OPEX del PS es considerablemente menor al del AS (entre un 43 y 52% menos), en donde el CAPEX duplica al del PS. Por otra parte, el OPEX considera costos de personal, mantenimiento, energía y consumo químico, en este sentido, el costo de personal del PS es menor ya que requiere menos tiempo para producir un módulo en el sistema piloto, requiriendo menos tiempo de supervisión. En cuanto a los productos químicos y energía utilizados son mayores en el AS. Por otra parte, un gran consumo de electricidad se asocia a la generación de ozono (1,34 kWh/módulo), lo que se traduce en un 57% y 89% de la electricidad utilizada (Senán, J., et al., 2019). En la Figura 40 se muestran los costos de la producción de 300 membranas al año para membranas de agua salobre BW y agua de mar SW.

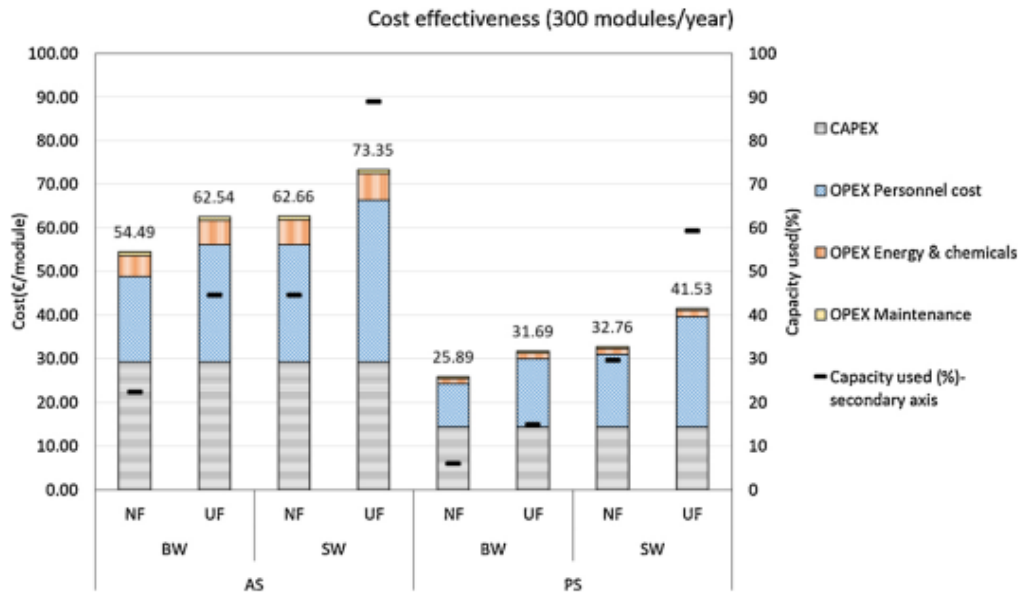


Figura 40: Análisis de rentabilidad (euro/módulo) considerando los dos sistemas piloto (AS y PS) para transformar membranas EoL de OI en cada escenario, asumiendo una productividad de 300 módulos reciclados por año con un piloto (de cada sistema) **Fuente:** Senán, J., García, R., Landaburu, J. y García, E., 2019

Según el trabajo de magister de Herrera (2020), para el diseño de una planta de reciclaje de membranas de OI, menciona los siguientes costos de producir un elemento de membrana reciclado:

- 1) La sustitución de una membrana de UF (con una vida útil promedio de 5 años), por una membrana reciclada (con una vida útil estimada de 2 años) para el tratamiento de agua, genera un ahorro de 98,9%. Basándose en la metodología de ecoeficiencia de entrada de material por unidad de servicio (MIPS) se determina que el reciclaje de una membrana de OI que pesa 13,5 kg, resulta en 2.609,81 kg de materiales que no se contaminan o extraen del medio ambiente. En este sentido cada elemento de membrana reciclado tiene un costo alrededor de € 6,82 (\$ 5.898,93). (Coutinho de Paula, E., 2018)
- 2) Mediante un análisis de ciclo de vida (LCA) y de rentabilidad, se reporta que el costo

de un proceso de reciclaje con sistema pasivo es de € 25,9 – 41,5 por módulo (\$22.402,09 - \$35.895,24), en donde los precios que más influyen son los del hipoclorito, bisulfito y electricidad. Por otra parte, se menciona que la vida útil de las membranas recicladas podría ser 14 veces más corta que las membranas comerciales (Senán, J. et al, 2019).

- 3) A partir de un diseño básico de una planta de reciclaje y sin incluir costos de impuestos por prácticas fiscales ni costos por transporte de membranas, el costo del proceso con un sistema pasivo es de € 16,02 por módulo (\$13.856,43) (Herrera, 2020).

Sin embargo, no solo deben evaluarse los costos por membrana, sino que también el flujo de permeado y la superficie requerida, pues si bien las membranas pueden tener niveles de rechazo dentro de los rangos necesarios, el flujo de permeado en las membranas recicladas podría ser menor, lo que significa que, para tratar un mismo caudal, sería necesaria una superficie de filtración mucho mayor que con las membranas comerciales. Un ejemplo de esto es lo que se muestra en la Tabla 26, en donde se requieren 4 veces más membranas recicladas (68 módulos) por membrana comercial (17 módulos). En la práctica se busca que las características de las membranas recicladas no difieran mucho de las comerciales (Herrera, R., 2020.).

Tabla 26: Características de una membrana comercial UF DW74-1100 (DOW) y de una membrana reciclada UF hipotética.

	Membranas recicladas UF	Membranas comerciales UF
características de la membrana		
Flujo (LMH)	20	40
Superficie unitaria ($m^2/módulo$)	37	74
Tratamiento de agua residual		
Caudal (L/h)	50.000	50.000
Superficie requerida (m^2)	2.500	1.250
Módulos de membrana		
Unidades requeridas (módulo)	68	17

Fuente: Adaptado de Herrera, R., 2020.

A continuación, se presentan los costos de la planta de reciclaje del estudio de Herrera, 2020, que permite obtener membranas de OI transformadas en UF, las cuales se utilizan en una planta de tratamiento terciario con producción 1.000 m³ de agua diarios. (Ver Figuras 27, 28, 29 y 30)

Tabla 27: Costos de reactivos

	Cantidad [kg]	Precio		Costo		Costo por módulo	
		€	\$	€	\$	€	\$
NaClO (10 %)	17.520	0,55	475,72	9.636	8.334.615,87	0,550	475
NaHSO ₃	3.942	2,3	1.989,37	9.067	7.842.461,82	0,518	448
NaOH (0,1 %)	526	3	2.594,84	1.577	1.364.019	0,090	77,85
*O ₂ (99,5%)	9.483	11	9.514,40	104.311	90.223.341,21	5,954	5.150
Agua	2.355.710	0,001448	1,25	3.486	3.015.200,39	0,199	172
Total				128.077	110.779.638,51	7,13	6.167

Fuente: Adaptado de Herrera, R., 2020. **Nota:** conversión de 1 € = \$864,95

Tabla 28: Resumen de la energía total consumida

Tipo	Valor
Energía total [Kwh/día]	161,2
Energía total [Kwh/año]	58.833,9
Energía total [Kwh/módulo]	3,4
Tarifa	0,09449 [€/Kwh] = 81,73 [\$/Kwh]
Costo	5.559,2 [€/año] = 4.808.232 [\$/año]

Fuente: Herrera, R., 2020. **Nota:** conversión de 1 € = \$864,95

Tabla 29: Costo total

		Cantidad	Costo (CAPEX) y Costo anual (OPEX)		Costos por módulo	
			€	\$	€	\$
CAPEX	Bomba	7x2	21.000	18.163.857	-	-
	Tanque de almacenamiento (1 m ³)	3	3.600	3.113.804	-	-
	Reactor de membranas (1 m ³)	8	20.000	17.298.912	-	-
	Tanque de mezclado (3,5 m ³)	2	3.200	2.767.826	-	-
	Proceso de ozonización*	1	151.486	131.027.150	-	-
	CAE Inversión [€/año] 5% a 25 años	-	14.140	12.230.331	0,81	700,61
OPEX	Reactivos y agua	-	109.111	94.375.080	6,23	5.388,61
	Energía	-	5.559	4.808.232	0,32	276.78
	Trabajadores	-	132.000	114.172.820	7,53	6.513
	Mantenimiento (10% inversión)	-	19.929	17.237.501	1,14	986.04
	O&M	-	266.599	230.593.633	15,22	13.164
Total			280.739	242.823.965	16,02	13.856

Fuente: Adaptado de Herrera, R., 2020. **Nota:** conversión de 1 € = \$864,95

Al revisar la Tabla 29, se puede apreciar que el proceso de ozonización se lleva la mayor parte del CAPEX, representando un 76% de la inversión. Este proceso es un método de desinfección y purificación de agua mediante la aplicación de ozono (O₃) en forma de gas al agua no tratada. El ozono funciona como un oxidante muy potente, capaz de destruir o transformar compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua, como bacterias, virus, metales pesados, pesticidas, detergentes, etc. (CYTED, s.f.). En el contexto del estudio de Herrera (2020) se busca eliminar los compuestos orgánicos halogenados, también llamados por sus siglas en inglés AOX (Adsorbable Organically bound halogens). Sin embargo, las plantas desalinizadoras pueden utilizar el proceso de ozonización en una etapa previa o posterior a la desalinización ya que una ozonización previa ayuda a reducir la formación de subproductos de desinfección que pueden ser tóxicos o corrosivos (cloroformo o bromato) y la ozonización posterior puede mejorar el sabor y

el olor del agua desalinizada, así como eliminar posibles microorganismos (AQUAE, 2021 y Terram, 2022).

Cabe destacar que según lo mencionado por Herrera (2020), si un reactor opera una sola vez por día para transformar 6 membranas, el séptimo día se transformarían 42 membranas. En el caso de la planta de reciclaje planteada por el autor se utilizarían 8 reactores, permitiendo la transformación de 48 módulos diarios, es decir, 17.520 módulos al año

En cuanto a los costos de operación y mantenimiento Herrera (2020) muestra una tabla resumen (Ver Tabla 30).

Tabla 30: Costos de operación y mantenimiento

		Costo		Costos de agua	
		€/año	\$/año	€/m3	\$/m3
OPEX	Reactivos	399,36	297.318,71	0,0013	1,14
	Energía	3.263,09	2.858.845,19	0,0107	9,37
	Reposición	1.998,00	1.750.479,66	0,0065	5,69
	Mantenimiento (estimado)	2.000,00	1.752.231,89	0,0066	5,78
	Otros	1.000,00	876.115,95	0,0032	2,80
Total	O&M	8.660,45	7.587.558,35	0,029	25,41

Fuente: Adaptado de Herrera, R., 2020. **Nota:** conversión de 1 € = \$876,12

3.3. Propuesta de reutilización y análisis financiero

En Chile la aplicación de la desalinización con foco a la producción de agua ultrapura utilizable en plantas de producción de hidrógeno verde es una realidad en vías de desarrollo, más aún en términos de la transformación y reutilización de membranas industriales para reducir la contaminación ambiental producto del agua desalinizada y los desechos en vertederos. Si bien el agua de rechazo producto de la desalinización es un tema de amplio estudio y tiene muchas variables negativas hacia el medio ambiente, se sugiere seguir las vías de investigación hacia la evaporación para la obtención de minerales o su uso en generadores de energía como es el caso de la planta de concentración solar. El foco de este trabajo son las membranas desechadas al final de

su vida útil, por lo tanto, tomando esto en consideración y lo dispuesto en el punto 3.2 de economía circular, se decide generar una propuesta basada en la reutilización de membranas de OI desechadas para reemplazar membranas de NF en una planta desaladora que busque producir agua ultra pura, dado que estas membranas presentan igual tamaño (8x40”), lo que facilitaría su reemplazo según los modelos utilizados en las plantas de Pure Aqua. En este sentido, se debe considerar el tamaño de una planta desaladora de referencia que utilice un número de módulos de membranas que haga factible un tratamiento de esta magnitud. Por esta razón, se selecciona el proyecto que se encuentra a cargo de la empresa Desala Petorca SPA, que tiene contemplado la construcción de una planta desaladora de ósmosis inversa, que tendrá una producción inicial de 1.200 lt/seg. (Portal minero, 2023). Utilizando este dato, se realizan los siguientes cálculos:

$$\text{Producción: } 1.200 \frac{\text{litro}}{\text{seg}} * 3600 \frac{\text{seg}}{\text{h}} * 0,001 \frac{\text{m}^3}{\text{litro}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 103.680 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Opción de cálculo N°1:

Un cálculo sencillo para obtener el número de membranas consiste en considerar los sistemas de OI de la Tabla 13 y NF de la Tabla 17:

En el caso de un sistema de OI, el de mayor tamaño es el modelo SW-660K-18880, que produce 2.500 m^3 de agua diarios y utiliza 144 membranas.

$$\text{N° de membranas de OI} = \frac{103.680 \text{ m}^3/\text{día}}{2.500 \text{ m}^3/\text{día}} \approx 42 * 144 = 6.048 \text{ módulos}$$

Para un sistema de NF, el de mayor tamaño es el modelo NF-855K-18780 que produce 3.236 m^3 de agua diarios y utiliza 126 membranas.

$$\text{N° de membranas de NF} = \frac{103.680 \text{ m}^3/\text{día}}{3.236 \text{ m}^3/\text{día}} \approx 32 * 126 = 4.032 \text{ módulos}$$

Opción de cálculo N°2:

El cálculo anterior implica la disposición a pagar por varios sistemas de nanofiltración,

pero la empresa desalinizadora podría contar con un sistema especialmente diseñado con tubos y bastidores (estructuras de soporte y fijación de membranas) para utilizar un número menor de membranas consiguiendo el mismo flujo de permeado, por lo tanto, el cálculo más específico consiste en dividir la producción necesaria por el máximo flujo de permeado de las membranas para el caso de OI y de NF. Para esto se utiliza la membrana con mayor tasa de flujo de permeado (SW30XLE-400i y NF270-400/34i), con la finalidad de obtener un límite mínimo de membranas. Es importante notar que estos valores podrían cambiar según el caudal de entrada necesario para un proyecto específico.

$$\text{N}^{\circ} \text{ de membranas de OI} = \frac{103.680 \text{ m}^3/\text{día}}{28 \text{ m}^3/\text{día}} = 3.703 \text{ módulos}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ de membranas de NF} = \frac{103.680 \text{ m}^3/\text{día}}{47 \text{ m}^3/\text{día}} = 2.206 \text{ módulos}$$

A partir de los cálculos realizados, en la Tabla 31 se presentan los límites mínimo y máximo de membranas que podrían utilizarse.

Tabla 30: Valores mínimo y máximo de membranas a evaluar para comparación entre la compra de membranas nuevas y el uso de membranas transformadas a partir de la inversión de una planta de reciclaje.

Tipo de membrana	Rango de membranas
Ósmosis Inversa	[3703 - 6048]
Nanofiltración	[2206 - 4032]

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 29 se muestra que, para el proyecto planteado, el costo CAPEX = \$172.271.549 (sin considerar el financiamiento mediante crédito) es similar al OPEX = \$230.593.633, representando un 42,76%, lo que concuerda con los datos mostrados en la Figura 40, en donde el OPEX en cada caso representa cerca de la mitad del costo total. Tomando lo anterior en consideración, es posible utilizar el gráfico de la Figura 39 para obtener una aproximación del

costo de crear una planta piloto que produzca un número determinado de membranas. Esto dado que el número de cada compuesto, electricidad y mantenimientos brindados por Herrera (2020) son valores calculados específicamente para ese caso y, además, consideran el proceso de ozonización, el cual no es requerimiento para una planta productora de membranas reutilizadas. A pesar de esto, se utilizan los valores de ese proyecto para realizar una aproximación del costo para una planta de menor tamaño ya que no se cuentan con valores específicos para calcular un balance de materia que permita una mayor exactitud.

Los supuestos considerados para el cálculo de costos y viabilidad de la propuesta son los siguientes:

Supuesto 1:

Se considera el uso de membranas de nanofiltración en vez de ultrafiltración, debido a los tamaños de 8x40” que utilizan los sistemas de ejemplo de la empresa Pure Aqua, pues los costos promedios entre membranas son muy similares, si comparamos por ejemplo los de OI con UF y considerando que el nivel de rechazo de una membrana de NF se encuentra entre los valores de UF y OI.

Supuesto 2:

El análisis de costos considerará solo la viabilidad de reemplazar las membranas de NF nuevas por membranas OI sin vida útil y transformadas en membranas de NF, tomando en cuenta el uso de las membranas necesarias por año. En este sentido, los costos de operación y mantenimiento, así como de los equipos, químicos y electricidad utilizados en la inversión se tomarán como una caja negra, evaluando costos aproximados.

Supuesto 3:

Se asumirá que el flujo de permeado de las membranas producidas, así como su coeficiente

de rechazo, se encuentran en valores aceptables para reemplazar un número equivalente de membranas comerciales, puesto que el flujo de permeado podría ser menor.

A continuación, se presentan los valores considerados para el flujo de caja:

- **Costo promedio de membranas de nanofiltración nuevas:** \$672.440
- **Costo del sistema de fabricación de membranas reusadas:** Considerando la necesidad de 4.032 membranas, utilizando el gráfico de la Figura 38, se aproxima un costo por membrana de 20 €/módulo (\$16.156 aproximadamente al cambio de 1€ = \$807,8). Para lograr esto, se necesitaría contar con una producción de 4.380 membranas anuales utilizando dos reactores (producción de 12 módulos diarios), lo que se traduce en un costo total de \$70.763.280 para el sistema de transformación de membranas. Para fines de cálculos se consideran solo 4.032 membranas con la finalidad de realizar la comparación directa con la cantidad de membranas nuevas que se necesitan. En el caso de Herrera (2020), el costo por membrana se calcula sumando el costo anual de OPEX y el costo anual equivalente (CAE) de la inversión del CAPEX. Bajo este escenario se busca una proporcionalidad de costos:

$$\text{Razón CAE/Inversión} = \frac{12.230.331}{172.371.549} = 7,10\%$$

$$\text{Razón CAE/Costo Total} = \frac{12.230.331}{242.823.965} = 5,04\%$$

Considerando lo anterior, se realiza una aproximación:

$$\text{OPEX aproximado} = \$70.763.280 * 94,96\% = \$67.196.810$$

$$\text{Cuota de CAE aproximada} = \$70.763.280 * 5,04\% = \$3.566.469$$

$$\text{CAE} = \frac{\text{Precio del activo} * \text{Tasa de descuento}}{1 - (1 + \text{Tasa de descuento})^{-n}}$$

La inversión utilizando la tasa de descuento del ejemplo de 5% y el periodo de 25 años:

$$\$3.566.469 = \frac{\text{Inversión} * 0,05}{1 - (1 + 0,05)^{-25}}$$

Inversión inicial CAPEX = \$50.265.621

- **Reposición de membranas:** basado en el documento de Herrera (2020), se considera una vida útil de 2 años para las membranas transformadas de NF con una reposición del 66,66% y un costo de reposición de 100€/módulo (\$80.782 por módulo aproximadamente al cambio de 1€ = \$807,82), considerando las 4.032 membranas nuevas, el costo anual es de:
 $4.032 * 66,66\% * \$80.782 = \$217.120.301$
- **Costo de membranas que se necesitan comprar por año sin el sistema:** considerando una vida útil de 5 años para las membranas nuevas, el costo de comprar 4.032 membranas nuevas es: $4.032 * \$681.478 = \$2.747.719.296$
- **Tasa de descuento o costo de capital en %:** considerando un nivel de riesgo alto, al tratarse de un proyecto que sigue en materia de investigación utilizando conceptos novedosos en el desarrollo de nuevos productos, se decide utilizar una tasa de descuento de 25%
- **Horizonte de evaluación:** se establecen 25 años, dado que, según las Figuras 1 y 2 se espera una disminución de los costos asociados a la producción de hidrógeno verde producto de la disminución del costo energético a partir de fuentes renovables hacia el año 2050.

3.3.1. Análisis Financiero

A partir de los supuestos planteados, se realiza este análisis en donde se evalúa la factibilidad de implementar una planta de transformación de membranas de OI en NF, dentro de una planta desalinizadora y la viabilidad de implementarlo en una planta de hidrógeno verde. Para esto se realiza un flujo de caja en donde se considera como beneficio el ahorro obtenido al no

invertir en la compra y reemplazo de membranas nuevas cada 5 años. Como costos se consideran la Operación y Mantenimiento (O&M) año por medio, en donde la planta produce 4.380 membranas, además se incluye el costo de reemplazo, considerando 4.032 de las membranas obtenidas (66,66% de reposición), el resto de los años solo se considera la mantención de la planta (10% de inversión inicial).

3.3.1.1. Resultados de flujo de caja

En la Tabla 31 se resumen los valores utilizados para realizar el flujo correspondiente, de donde se obtiene un VAN de \$616.608.348, lo que implica que se trata de un proyecto rentable y por lo cual resulta conveniente invertir, considerando además que la TIR es mayor a la tasa de descuento y que el plazo de recuperación es de 5 años.

Tabla 31: Resumen de valores considerados para el flujo de caja ante la evaluación de una planta de transformación de membranas de OI a NF.

Proyecto	
Inversión inicial CAPEX (Inversión equipos: bombas, tanques de almacenamiento, reactores de membranas, tanques de mezcla) (\$)	\$50.265.621
OPEX (Reactivos y agua, energía, trabajadores y mantenimiento)	\$67.196.811
Cuota inversión (CAE 5% a 25 años)	\$3.566.469
Producción x costo membranas transformadas (\$)	\$70.763.280
Vida útil (años)	25
N° Membranas nuevas	4032
Producción anual transformadas (unidad)	4380
Costo transformación (\$/módulo)	\$16.156
Costo Membrana nueva (\$/módulo)	\$672.440
Incremento anual (costo membrana)	5%
Operación y Mantenimiento (O&M)	\$67.196.811
Incremento anual (O&M)	10%
Solo Mantenimiento Planta (10% de inversión)	\$5.026.562
Incremento anual (mantenimiento)	10%
Costo Reposición membrana 66,66%	\$80.782
Incremento anual (reposición)	10%
Impuesto % (final de año)	19%
Indicadores	
Tasa o coste Ke	25%
TIR(TIR>=Ke)	62%
VAN (>=0)	\$616.608.348
Playback	5 años

Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar distintos escenarios se realiza un análisis de los valores críticos para los que el VAN es cero, para esto se evalúa el costo de una membrana nueva, el número de membranas nuevas a comprar y el costo de reposición de dichas membranas (Ver Tabla 32).

Tabla 32: Valores límites en los cuales el Valor Actual Neto (VAN) se hace cero.

VAN (=0)			
Sensibilidad	Proyecto	Limite	Diferencia
Costo membrana nueva	\$672.440	\$332.885	-\$339.555
Número de membranas nuevas	4.032	1.149	-2.883
Costo reposición membrana 66,66%	\$80.782	\$219.655	\$138.873

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 32 se aprecia que el costo más bajo que puede tener una membrana nueva es de \$332.885, lo que indica que a ese precio no es rentable crear una planta de transformación de 4.380 membranas anuales puesto que convendría comprar las membranas nuevas a ese precio. Por otra parte, si el número de membranas nuevas necesarias para operar la planta de desalinización para producir los $103.680 \text{ m}^3/\text{día}$ fuesen 1.149, el proyecto tampoco sería rentable puesto que los costos para producir las membranas de NF serían mayores (se estaría produciendo más de las membranas necesarias), sin embargo, este escenario se descarta dado que el número de membranas para ese caudal es de mínimo 2.206 como se aprecia en la Tabla 30. Finalmente, si el costo de reposición de las membranas aumentara en \$138.872 el proyecto tampoco sería rentable.

En la Tabla 33 se presenta un resumen de análisis unidimensional para los tres escenarios anteriores variando las cantidades y mostrando el VAN respectivo para cada situación a fin de tener una idea de los valores intermedios. De esta misma forma en las Tablas 34 y 35, se realizan análisis bidimensionales entre las unidades de membranas nuevas adquiridas, el costo de membranas nuevas y el costo de reposición para comprender cómo varía el VAN si dos variables cambian al mismo tiempo.

Tabla 33: *Análisis unidimensional del Valor Actual Neto (VAN) respecto de los costos unitarios de membranas nuevas, cantidad de membranas nuevas y costos de reposición por módulo.*

ANÁLISIS UNIDIMENSIONAL	
Costo membrana nueva (\$/módulo)	VAN
	\$616.608.348
\$250.000	-\$150.512.541
\$332.885	\$0
\$350.000	\$31.080.322
\$450.000	\$212.673.184
\$550.000	\$394.266.047
\$672.440	\$616.608.348
Número de membranas nuevas	VAN
	\$616.608.348
800	-\$74.700.209
1149	\$0
1500	\$75.026.273
2206	\$226.036.125
3500	\$502.816.222
4032	\$616.608.348
Costo reposición membrana (\$/módulo)	VAN
	\$616.608.348
\$70.000	\$664.481.286
\$80.782	\$616.608.348
\$100.000	\$531.278.898
\$150.000	\$309.274.919
\$219.655	\$0
\$300.000	-\$356.737.019

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 34: *Análisis bidimensional del Valor Actual Neto (VAN) de las unidades de membranas nuevas requeridas y el costo de cada membrana nueva.*

Unidades membranas nuevas							
	\$616.608.348	800	1149	1500	2206	3500	4032
Costo membrana nueva	\$250.000	-\$226.906.734	-\$218.651.864	-\$210.360.962	-\$193.673.369	-\$163.087.328	-\$150.512.541
	\$332.885	-\$197.043.135	-\$175.751.393	-\$154.366.713	-\$111.324.494	-\$32.434.080	\$0
	\$350.000	-\$190.876.404	-\$166.892.593	-\$142.804.094	-\$94.319.735	-\$5.454.634	\$31.080.322
	\$450.000	-\$154.846.075	-\$115.133.322	-\$75.247.225	\$5.033.900	\$152.178.059	\$212.673.184
	\$550.000	-\$118.815.745	-\$63.374.051	-\$7.690.357	\$104.387.535	\$309.810.752	\$394.266.047
	\$672.440	-\$74.700.209	\$0	\$75.026.273	\$226.036.125	\$502.816.222	\$616.608.348

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 35: *Análisis bidimensional del Valor Actual Neto (VAN) de las unidades de membranas nuevas requeridas y el costo de reposición de cada membrana.*

Unidades membranas nuevas							
	\$616.608.348	800	1149	1500	2206	3500	4032
Costo reposición membrana	\$70.000	-\$65.201.610	\$13.645.186	\$32.836.146	\$252.228.511	\$544.372.592	\$664.481.286
	\$80.782	-\$74.700.209	\$0	\$75.026.273	\$226.036.125	\$502.816.222	\$616.608.348
	\$100.000	-\$91.630.655	-\$24.321.386	\$43.281.686	\$179.350.419	\$428.745.519	\$531.278.898
	\$150.000	-\$135.679.064	-\$87.599.006	-\$39.309.080	\$57.886.932	\$236.033.731	\$309.274.919
	\$219.655	-\$197.043.135	-\$175.751.393	-\$154.366.713	-\$111.324.494	-\$32.434.080	\$0
	\$300.000	-\$267.824.290	-\$277.431.866	-\$287.081.378	-\$306.503.528	-\$342.101.632	-\$356.737.019

Fuente: *Elaboración propia.*

En las Tablas 34 y 35 se aprecia que el VAN sigue siendo positivo para rangos entre 2206 y 4032 membranas, mientras que el costo de una membrana nueva se mantenga en el rango de \$450.000 a \$672.440 y el costo de reposición en el rango de \$80.782 a \$150.000.

En el caso de una planta de hidrógeno verde la necesidad más alta de membranas de OI según la Tabla 13 es de 24 membranas, mientras que el sistema más pequeño de NF que cubre el caudal necesario es el de la Tabla 17 que ocupa 28 membranas y que da un total de 140 membranas en un horizonte de 25 años, considerando reemplazos cada 5 años. Utilizando los datos de precio de membranas de NF nuevas y los costos de reposición de la Tabla 31, se calcula el Valor Actual de los Costos (VAC) para un horizonte de 25 años de este escenario, considerando una tasa de descuento de 10% al ser un proyecto de riesgo mediano por encontrarse aún en investigación a nivel internacional, entregando un $VAC = \$43.407.825$. En este sentido, implementar una planta de transformación dentro de una planta de hidrógeno verde, como la evaluada para la planta desalinizadora no sería rentable, pues como se aprecia en la Tabla 35 para menos de 1149 membranas el VAN es negativo. Sin embargo, si una planta de hidrógeno verde compra las 28 membranas transformadas de NF cada 2 años a \$102.470 cada una, genera un $VAC = \$43.407.668$, lo que indica un punto de ahorro de \$156, hasta el cual es factible la compra de dichas membranas.

En cuanto a las membranas de OI, si se considera el horizonte de 25 años, con una reposición del 66,66% de las membranas cada 5 años, se calcula un desecho de 13.440 membranas, por otra parte, con una planta de transformación de 4.032 membranas de las 4.380 posibles, con una vida útil de 2 años, se estarían recuperando 34.944 membranas de OI agotadas y de esas 32.256 serían desechadas al final de horizonte de evaluación. En caso de producir las 4.380 membranas máximas, sobrarían 348 membranas cada 2 años, las que podrían guardarse en caso de emergencia o ser vendidas a un menor precio, generando utilidades adicionales.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo deja en evidencia la importancia de la utilización correcta de los recursos naturales para obtener energía y solucionar distintas necesidades de la población. En este caso el uso de membranas industriales para retener sales, minerales y contaminantes nace de las necesidades básicas del consumo de agua dulce y extiende su usabilidad hacia el sector de la energía, en donde la producción de hidrógeno verde requiere contar con agua ultrapura, pero tiene consecuencias ambientales difíciles de mitigar como la contaminación acuática tras los vertidos de salmuera, la contaminación terrestre producto de los residuos en vertederos y la contaminación atmosférica tras los gases de efecto invernadero como el CO₂ producto de las incineraciones.

A través de la investigación se encuentran variadas soluciones ambientales innovadoras para la reutilización de las membranas de OI, NF y UF, en la fabricación de plásticos de botellas, geotextiles, redes de pájaros, cortavientos, agregados en hormigón, entre otros, tras la separación de sus partes o su reutilización directa mediante la degradación ante agentes oxidativos. Sin embargo, es un campo muy amplio y que debe seguir en estudio, sobre todo en Chile, en donde las tecnologías asociadas al hidrógeno verde se encuentran en una etapa base, a comparación de países como España de donde surgen algunos de los estudios referenciados que aportan más información. Cabe destacar que si bien los procesos de separación de las partes que componen a las membranas desechadas implican un mayor coste y dificultad en el caso de las láminas y espaciadores debido a la suciedad que pueden contener, estas soluciones ayudan a evitar la producción de CO₂ y dichos costes podrían disminuirse si se buscan formas de generar utilidades tras la venta de los productos que se pueden crear, o si se sigue una línea de investigación que permita utilizar métodos más sofisticados y aplicable a menor escala.

En cuanto a los resultados que se obtienen tras la evaluación de integrar una planta de

transformación de membranas en una planta desalinizadora o de hidrógeno verde, es importante destacar que inicialmente se realiza un supuesto de que el flujo de permeado se mantiene, lo cual no es seguro y tal como se menciona en el estudio esto implica que podría necesitar una mayor cantidad de membranas para lograr la misma capacidad de producción inicial, que en casos extremos podría cuadruplicar la cantidad de membranas nuevas, es decir, si inicialmente se utilizan 28 membranas, en realidad podrían necesitarse hasta 96. Por esta razón, es que para lograr un escenario factible, no solo es necesario contar con un gran número de membranas desechadas y que estén en las condiciones óptimas para su tratamiento, sino que, también se debe considerar la dificultad de llevar a cabo todo el proceso previo dado que las pruebas que se realizan a las membranas son destructivas y necesitan contar con equipos especializados de análisis en laboratorio, lo que implica altos costos ya sea por la compra de dichos equipos o por contratar un servicio externo que realice estos análisis. Este hecho ha influido en la baja cantidad de estudios y países en los que se realizan, que permitan dar una mayor certeza en cuanto a la permeabilidad de las membranas a partir de los tiempos de exposición al cloro libre. Considerando lo anterior, es posible realizar los tratamientos de membranas siempre y cuando se tome en consideración que los puntos de estudios químicos aún se encuentran en una etapa inicial y que ante la necesidad de mantener el flujo de permeado se podría requerir una cantidad de membranas igual o mayor a la original y, por ende, una planta que cuente con una gran capacidad de instalación y reemplazo de membranas. Por lo tanto, para tamaños de plantas pequeñas la implementación de este tipo de tratamiento no tiene posibilidades de funcionar en el corto plazo.

Un hecho muy importante a considerar es que a partir de los resultados se obtiene que el número mínimo de membranas que debe adquirir una planta desalinizadora para implementar una planta de transformación que sea rentable es de 1.149, lo que al día de hoy supera con creces las

28 membranas utilizadas en el diseño de las plantas de los proyectos de hidrógeno verde considerados dentro de este estudio y que como máximo consumen $316,8 \frac{m^3}{día}$ a diferencia de los $103.680 \frac{m^3}{día}$ de Desala Petorca SPA, lo que indica que no es rentable para una planta pequeña tener que invertir en ampliaciones de sistemas de desalinización, mantenimientos y reemplazos asociados porque además el VAC para una planta de hidrógeno verde que compra 28 membranas de NF es de \$43.407.825, un valor que es inferior a la inversión inicial de \$50.265.621 de la Tabla 31. A partir de esto surge la posibilidad de implementar nuevos modelos de economía circular: el primero modelo podría ser que una planta de hidrógeno verde compre el agua pura directamente a una planta desalinizadora de gran tamaño, en vez de realizar su propia producción, por ejemplo, considerando el caso de instalar una planta de hidrógeno verde cerca de una minera u otra empresa que se dedique a la venta y distribución de agua para aplicaciones industriales, agrícolas o de consumo humano. Un segundo modelo consiste en agrupar las membranas de ósmosis inversa desechadas por varias plantas de hidrógeno verde que trabajen bajo un marco regulatorio de economía circular, y que por ley deban hacerse cargo de los residuos, enviando dichas membranas a una planta desalinizadora que cuente con el sistema de transformación, aunque también habría que considerar los costos de transportes asociados. Por último, un tercer modelo es la reventa de membranas de OI transformadas y sobrantes para su reutilización en las plantas de hidrógeno verde a un precio competitivo como lo hace la empresa estadounidense WaterSurplus, solo que en este caso sería a un precio máximo de \$102.470, ya que a partir de este precio se comienza a generar el ahorro mínimo de \$156 que incrementaría a medida que el precio disminuye, lo que indica la factibilidad en el escenario ideal de permeabilidad, pero como se menciona anteriormente la cantidad de membranas para mantener el mismo flujo de permeado podría aumentar y en este caso sería necesario disminuir aún más el precio de venta. De esta forma, el uso alternativo de

membranas industriales es económicamente viable siempre y cuando los procesos de transformación se realicen en plantas desalinizadoras lo suficientemente grandes como para cubrir los costos asociados a las autopsias de membranas, instalación, ampliación de sistemas desalinizadores, mantención y reposición.

A pesar de que hoy en día es algo nuevo llevar a cabo este tipo de tratamiento porque solo hay estudios y pruebas a escala piloto, y de laboratorio salvo por la empresa WaterSurplus, es factible realizarlos y obtener beneficios económicos y ambientales, además como se espera una disminución en el costo del hidrógeno hacia el año 2050, los precios del oxígeno combinados con la disminución del costo de energía eléctrica producto de fuentes renovables podrían implicar grandes disminuciones de costos en procesos como el de ozonización, haciendo aún más rentable instalar una planta de transformación de membranas que lo contenga y posiblemente su implementación directa en una planta de hidrógeno verde.

En cuanto al hidrógeno verde como vector energético en Chile, hay un largo camino por recorrer y una gran cantidad de desafíos técnicos, sociales y políticos, sobre todo en el ámbito de regulación, pero existen altas expectativas de las aplicaciones futuras en el desarrollo energético.

5. REFERENCIAS

- ACS Energy Lett. (2021). Does the Green Hydrogen Economy Have a Water Problem?.
<https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.1c01375>
- Agencia Internacional de la Energía. (s. f.). *Revisión global del hidrógeno 2021*. Consultado el 01 de junio de 2022. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021/executive-summary>
- Aimone, G. (2020). Desalación del agua de mar, una alternativa de progreso para Chile. *Revista de marina*. <https://revistamarina.cl/es/articulo/desalacion-del-agua-de-mar-una-alternativa-de-progreso-para-chile#:~:text=La%20desalinizaci%C3%B3n%20genera%20efectos%20medioambientales,mar%20a%20trav%C3%A9s%20de%20difusores>.
- Aquae. (2021). Las plantas desalinizadoras más grandes del mundo. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/desalinizacion-en-el-mundo/>
- Araneda, R. (2022). Estudio técnico y económico de una planta de producción de hidrogeno verde para exportación a países industrializados. (Memoria para optar al título de Ingeniera Civil Mecánica). Universidad de Chile. Santiago.
- Aurelia Turbines. (2019). *For de green deal, Hydrogen also needs to be green*. Consultado el 02 de julio de 2022. <https://aureliaturbines.com/articles/for-the-green-deal-hydrogen-also-needs-to-be-green>
- Barandarian, J. (2018). Lithium and development imaginaries in Chile, Argentina and Bolivia, *Word Development*, 113(11), 381-91.
- Baykara, S. (2004). *Experimental solar wáter thermolysis*.
- BCN. (2015). La desalación del agua: regímenes comparados (Informe BCN).

obtiehttps://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/21754/4/Informe%20agua%20desalada_v3.pdfnearchivo (bcn.cl)

BCN. (2017). Impacto ambiental de la desalinización de agua de mar. <https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/24441/2/Impacto%20Ambiental%20de%20Desalinizaci%C3%B3n%20de%20Agua%20de%20Mar.pdf>

BCN. (2021). Plantas Desaladoras de Chile. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33266/2/Minuta_Desaladoras_en_Chile.pdf

BCN. (2022). Informe en materia regulatoria: regulación comparada del hidrógeno verde y propuestas de políticas para su fomento. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33527/1/N_26_22_Regulacion_comparada_en_H2_Verde.pdf

BCN. (2023). Ejecuta acuerdo de consejo N° 3.121, de 2022, que crea "comité de desarrollo de la industria de hidrógeno verde" y fija normas que regularán su funcionamiento; y aprueba su reglamento. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1177805>

BHP. (2022). Escondida pone fin a la extracción de agua de acuíferos altoandinos. <https://www.bhp.com/es/news/articles/2020/02/escondida-pone-fin-a-la-extraccion-de-agua-de-acuiferos-altoandinos>

Carbotecnia. (2019). Limpieza de las membranas de ósmosis inversa – Mantenimiento. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/proceso-de-limpieza-de-membranas-de-osmosis-inversa/#:~:text=Una%20frecuencia%20de%20limpieza%20de,entre%203%20y%2012%20meses.>

Centro Nacional del Hidrógeno. (s. f.). *El Hidrógeno*. Consultado el 20 de junio de 2022.

<https://www.cnh2.es/sobre-cnh2/>

Chesher, R. (1975). Biological impact of a large-scale desalination plant at Key West, Florida.

(Vol. 2, pp. 99-164).

Chile Desarrollo Sustentable. (2023). El creciente mercado de los electrolizadores, la otra pieza

clave del hidrógeno verde. [https://www.chiledesarrollosustentable.cl/noticias/noticia-pais/el-](https://www.chiledesarrollosustentable.cl/noticias/noticia-pais/el-creciente-mercado-de-los-electrolizadores-la-otra-pieza-clave-del-hidrogeno-verde)

[creciente-mercado-de-los-electrolizadores-la-otra-pieza-clave-del-hidrogeno-verde](https://www.chiledesarrollosustentable.cl/noticias/noticia-pais/el-creciente-mercado-de-los-electrolizadores-la-otra-pieza-clave-del-hidrogeno-verde)

Condorchem Evitech. (s.f.). Destilación por membranas para tratar aguas residuales.

<https://condorchem.com/es/blog/destilacion-por-membranas/>

Condorchem Envitech. (s.f.). La ósmosis inversa y sus diferentes aplicaciones.

<https://condorchem.com/es/empresa/>

Council, E. (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council. 19

November 2008 on waste and repealing certain directives (Waste framework). Off. J. Eur.

Union

Coutinho de Paula, J. C. (2017). Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes by oxidative

treatment: a technical evaluation. *Water Science & Technology*, 605-622.

Crittenden, J., et al. (2012). Membrane Filtration, in *MWH's Water Treatment: Principles and*

Design, (Third Edition), USA, John Wiley & Sons.

CYTED. (s.f.). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de

aguas residuales industriales.

https://cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf

Documen.tips. (s.f.). Silyzer-200-Pem based electrolyser for hydrogen generation. (Download

PDF) Silyzer-200-PEM Based Electrolyser for Hydrogen Generat

<https://dokumen.tips/download/link/silyzer-200-pem-based-electrolyser-for-hydrogen-generation.html> (dokumen.tips)

Duarte, M. (2014). *Desarrollo de un proyecto para el diseño de un prototipo para la obtención de hidrógeno combustible a través de un sistema de electrólisis, utilizando energía mareomotriz*. (Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniería de Ejecución Mecánica de Procesos y Mantenimiento Industrial). Universidad Técnica Federico Santa María. Viña del Mar, Chile.

El Mostrador. (2021). Chile es el país latinoamericano que genera más desechos plásticos de un solo uso. <https://www.elmostrador.cl/agenda-pais/2021/07/03/chile-es-el-pais-latinoamericano-que-genera-mas-desechos-plasticos-de-un-solo-uso/>

EconoJournal. (2022). Empezó en Chile la construcción de la primera planta a nivel mundial que producirá combustibles 'CO2 neutrales'. <https://econojournal.com.ar/2021/09/comenzo-en-chile-la-construccion-de-la-primera-planta-a-nivel-mundial-que-producira-combustibles-co2-neutrales/> Empezó en Chile la construcción de la primera planta a nivel mundial que producirá combustibles 'CO2 neutrales' • EconoJournal

Fariñas, M. (1999). *Osmosis inversa: fundamentos, tecnología y aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana de España.

Fasihi, M. y Breyer, C. (2020). Baseload electricity and hydrogen supply based on hybrid PV-wind power plants. *Journal of Cleaner Production*, 243.

Fúnez, C. y Reyes, L. (2019). *El hidrógeno como vector energético*. Actualiza. <https://doi.org/10.32457/ISBN9789568454456432019-ED1>

Gacia, E. y Ballesteros, E. (2001). El impacto de las plantas desalinizadoras sobre el medio marino: la salmuera en las comunidades bentónicas mediterráneas. In Conferencia Internacional: El Plan Hidrológico Nacional y la Gestión Sostenible del Agua. Aspectos Medioambientales,

Reutilización y Desalación (p. 10).

García, R. (2017). *Membranas de nanofiltración y ultrafiltración a partir de membranas de ósmosis inversa fuera de uso*. (Tesis doctoral en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos). Escuela de Postgrado de la Universidad de Alcalá. España.

Generadoras de Chile. (s. f.). *Hidrógeno Verde*. Consultado el 03 de julio de 2022.
<http://generadoras.cl/tipos-energia/hidrogeno-verde>

Godula, A. (2015). *Hydrogen production: by electrolysis*. John Wiley & Sons.

Gobierno de Chile. (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. Obtenido de Ministerio de Energía:
https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_h2_-_espanol2022.pdf (energia.gob.cl)

Godoy, E., Mena, S. y Susial, P. (2001). Reúso de membranas industriales de ósmosis inversa. Editorial alción.
https://www.researchgate.net/publication/275018585_Reuso_de_Membranas_Industriales_de_Osmosis_Inversa_Procedimiento_de_Modificacion

Gutiérrez, F. (2009). *Internacionalización de Tratamiento para Recuperación Membranas de Osmosis Inversa: el Caso de la Empresa Regenera*. (Tesis para optar al grado de Magister en Gestión para la Globalización). Universidad de Chile. Santiago.

Herrera, R. (2020). *Tecnología de membranas, Primeras consideraciones para el diseño de una planta de reciclaje de membranas de OI*. (Magister Universitario en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos). Universidad de Alcalá y Universidad Rey Juan Carlos. Alcalá de Henares. España.

Jimenez, M. (2020). *Estudio de factores estratégicos claves para la impulsión y desalinización de agua en proyectos mineros de la región de Antofagasta, Chile*. (Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil en Minas). Universidad Andrés Bello. Concepción.

- Kucera, J. (2014). *Desalination, Water from Water*. USA: Wiley
- Landaburu, J., García, R., Molina, S., Rodríguez, L., Rabadán, J., García, E. (2016). Fouling prevention, preparing for re-use and membrana recycling. Towards circular economy in RO desalination. *Desalination*, 383, p. 16-30
- Ladislao, F. (2020). *Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil*. (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico). Universidad de Chile. Santiago.
- Lawler, W., Bradford-Hartke, Z., Cran, M. J., Duke, M., Leslie, G., Ladewig, B. P., & Le-Clech, P. (2012). Towards new opportunities for reuse, recycling and disposal of used reverse. Elsevier, *Desalination*, 103–112.
- Lawler, W.; Alvarez-Gaitan, J.; Leslie, G.; Le-Clech, P. (2015). Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Options for Reverse Osmosis Membranes. *Desalination*, 357, 45–54.
- León, R., Peñate, B., Roo, J. y Vaswani, J. (2021). Reutilización de elementos de ósmosis inversa de los procesos de desalación. *DYNA*. July 2021, vol. 96, no. 4, p. 429-434. <https://doi.org/10.6036/10061>
- Li, D. & Wang, H. (2010). Recent developments in reverse osmosis desalination membranes. *Journal of Materials Chemistry*, 20(22), 4551. <http://doi.org/10.1039/b924553g>
- López, M. (2015). *Diseño de planta de tratamiento de agua potable por ósmosis inversa para un buque de pasaje*. (Trabajo de fin de grado para acceder al título de grado en Ingeniería Marítima). Universidad de Cantabria. España.
- Maldonado, L. (2017). *Obtención y caracterización de membranas poliméricas para desalinización de agua*. (Tesis para obtener el grado de Maestro en Nanociencias y Materiales). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. San Luis

Potosí. México.

Marca Chile. (2022). Los 6 proyectos que marcarán el despegue del hidrógeno verde en Chile.

<https://marcachile.cl/innovacion-emprendimiento/los-6-proyectos-que-marcaran-el-despegue-del-hidrogeno-verde-en-chile/#>

Masson, V., Zhai, P. , Pörtner, H., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P., Pirani, A., Moufouma, W.,

Péan, C., Pidcock, R., et al. (2018). “Global warming of 1.5 c,” *An IPCC Special Report on the impacts of global warming of*, (Vol. 1, pp. 1–9).

McKinsey & Company. (2020). *Chilean Hydrogen Pathway – Final Report*. In: ENERGÍA, M.D. (ed.). Ministerio de Energía.

Modern Water. (s.f.). *Osmosis Forzada: Desalinización*.

https://www.modernwater.com/assets/downloads/Factsheets/Spanish/MW_Factsheet_Membrane_Spanish_HIGHRES.pdf

MOP. (2021). Proyecto de Ley sobre el uso del agua de mar para Desalinización.

<http://bcn.cl/3121i>

Nuevo, D. (2020). La salmuera en el vertido de desaladoras. <https://www.tecpa.es/salmuera-desaladora/>

Oasis Expres. (2023). Centro de aprendizaje. <https://oasisexpres.com/blogs/news>

Peñaloza, N. y Morales S. (2019). Propuesta para la reutilización de agua de rechazo del proceso de ósmosis inversa del tratamiento de hemodiálisis en un hospital de tercer nivel. (Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario). Universidad de la Salle. Bogotá. D.C.

Plug Power. (2023). Best-in-Class Electrolyzer Products

<https://resources.plugpower.com/french/plugelx4250d-french->

050222gELX4250D_French_050222 (plugpower.com)

PortalMinero. (2023). Escase hídrica impulsa el desarrollo de plantas desaladoras en Chile.

<https://www.portalminero.com/wp/escasez-hidrica-impulsa-el-desarrollo-de-plantas-desaladoras-en-chile/#:~:text=2023%20%7C%20Noticias%2FPrincipal-,Chile,27%20de%20enero%20del%202023.>

Pisano, F. y Grupo Pentalia (2022). Webinar: Daños en membranas: cómo dañar irreversiblemente membranas de ósmosis. <https://www.youtube.com/watch?v=EuKAKtX-Vew>

Ramírez, P. (2022). Introducción al hidrógeno verde como vector energético [Diapositiva de PowerPoint]. Curso Hidrógeno Verde: Oportunidades y aplicaciones. CORFO. <https://capacita.corfo.cl/>

García, R., F. J.-P. (2016). Life+13 Transfomem: a recycling example within the desalination world. In Proceeding XI AEDYR International Congress , VAL–112–16

REMTAVARES. (2015). Membranas de ósmosis inversa: del residuo al recurso. <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2015/02/13/132095>

Reyes, L. (2020). Producción de hidrógeno verde en Chile, la ruta hacia la sustentabilidad energética. (Universidad Autónoma de Chile)

Senán, J., García, R., Landaburu, J. and García, E. (2019). *Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes: Comparative LCA and cost-effectiveness analysis at pilot scale. Resources, Conservation & Recycling, 150. p. 104423.* Resources, Conservation & Recycling, 150. p. 104423. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104423>

Senán, J., Blanco, A., García, R., Landaburu, L., García, E. (2020). *Prospective Life Cycle Assessment and economic analysis of direct recycling of end-of-life reverse osmosis membranes based on Geographic Information Systems.* doi:10.1016/j.jclepro.2020.124400.

- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (2021). Informe oceanográfico anual 2020. Armada de Chile. <https://www.shoa.cl/estudios-oceanograficos/informe-oceanografico-annual/>
- Smink, V. (2021). *Hidrógeno verde: 6 países que lideran la producción de una de las “energías del futuro” (y cuál es el único latinoamericano)*. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56531777>
- Sola, I. (2021). Aspectos ambientales de la desalinización de agua de mar: Regulación y gestión de los vertidos. (Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias del Mar y Biología Aplicada). Universidad de Alicante y Universidad de Playa Ancha.
- Soto, E. y Ramírez, H. (2022). Impactos ambientales, regulación y evaluación de los proyectos de desalinización de agua de mar. Fundación Terram.
- SQM. (2023). Sales Termo-Solares. <https://www.sqm.com/producto/sales-termo-solares/>
- Terram. (2022). Minuta Impactos ambientales, regulación y evaluación de los proyectos de desalinización de agua de mar. <https://www.terram.cl/descargar/naturaleza/agua/Minuta-sobre-la-regulacion-de-plantas-desaladoras.pdf>
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2020). *Production of Hydrogen*. <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/production-of-hydrogen.php>
- Ursúa, A., Gandía, L. y Sanchis, P. (2012). *Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends*, Proceedings of the IEEE, 100(2)
- UTEC. (2019). Obtención de sales a partir de residuos de desalinización de agua de mar. <https://utec.edu.pe/blog-de-carreras/ingenieria-quimica/obtencion-de-sales-partir-de-residuos-de-desalinizacion-de-agua-de-mar>
- Vásquez, R., Salinas, F. y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2018).

- Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile.* <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/07/LIBRO-TECNOLOGIAS-H2-Y-PERSPECTIVAS-CHILE.pdf>
- Vásquez, R., Salinas, F. y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2019). *Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile.* *Tecnologías-del-hidrógeno-y-perspectivas-para-Chile_2019.pdf*
- Vermeersch, A. (2018). *Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis de agua.* (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico). Universidad de Chile. Santiago.
- Vicencio, N. y Salinas, F. (2015). *Síntesis y caracterización de membranas para osmosis inversa con capacidad anti-bioincrustante, por incorporación de nano partículas de dióxido de titanio.* (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Biotecnología e Ingeniero Civil Químico). Universidad de Chile. Santiago.
- Winckler, P., COSTAR, CIGDEN (2021). *Guía para el modelado de la hidrodinámica y del proceso de mezcla de descargas salinas y térmicas asociadas a proyectos de plantas termoeléctricas y desalinizadoras.* Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.
- Zarza, E. (1997). Desalinización del agua del mar mediante energías renovables. In *Actas del I y II seminario del agua* (pp. 199-226). Instituto de Estudios Almerie
- Zuñiga, F. (2017). *Análisis de factibilidad de una planta desalinizadora en la localidad de Los Molles, Provincia de Petorca.* (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil). Universidad Técnica Federico Santa María. Santiago.