

Disponibilidad del recurso hídrico en el desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados en Chile



Imprint

Como empresa federal, la GIZ asiste al Gobierno de la República Federal de Alemania en su labor para alcanzar sus objetivos en el ámbito de la cooperación internacional para el desarrollo sostenible.

Publicado por:

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Domicilios de la Sociedad:

Bonn y Eschborn, Alemania

International PtX Hub
Potsdamer Platz 10
10785 Berlin, Alemania
T +49 61 96 79-0
F +49 61 96 79-11 15

E info@ptx-hub.org
I www.ptx-hub.org

Responsable :

Verónica Vukasovic & Rodrigo Carreño (International PtX Hub)

Investigador:

Rodrigo Carreño (International PtX Hub)

Registro de Propiedad Intelectual Inscripción: ISBN. 978-956-8066-55-0
Primera edición digital: septiembre 2023

El International PtX Hub es implementado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en nombre del Ministerio Federal Alemán de Asuntos Económicos y Acción Climática (BMWK). Financiado por la Iniciativa Internacional sobre el Clima (Internationale Klimaschutzinitiative, IKI), El International PtX Hub es una contribución a la Estrategia Nacional Alemana del Hidrógeno de 2020 y representa uno de los cuatro pilares del programa de acción PtX de la BMUV iniciado en 2019.

Las opiniones y recomendaciones expresadas no reflejan necesariamente las posiciones de las instituciones encargantes o de la agencia implementadora.

Santiago de Chile, septiembre de 2023

Resumen ejecutivo

Chile se ha comprometido con la acción climática, buscando la carbono neutralidad para 2050 y reconociendo el papel crucial del Hidrógeno Verde en su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC por sus siglas en inglés). La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, respaldada por diversos actores, establece ambiciosos objetivos para 2025 y destaca el potencial de las energías renovables en Chile, específicamente en el norte y las zonas más australes del territorio, como polos de desarrollo para el Hidrógeno Verde y sus derivados.

Sin embargo, el desarrollo de esta industria se enfrenta a desafíos. Chile experimenta escasez de agua en las regiones identificadas como polos de desarrollo para el Hidrógeno Verde y de sus derivados. A pesar de que se espera que el Hidrógeno Verde en Chile utilice agua de mar, es necesario considerar alternativas equilibradas y sostenibles para obtener agua y minimizar impactos negativos. Este estudio busca comprender el impacto del requerimiento hídrico en la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados en Chile, especialmente en las regiones de Antofagasta y de Magallanes y de la Antártica Chilena. Se analizarán tecnologías existentes como la desalinización y el reúso de aguas tratadas, con el objetivo de ofrecer alternativas de obtención de agua mientras se consideran impactos ambientales, económicos y sociales para su implementación.

La producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables requiere una fuente de agua para la electrólisis, enfrentando la problemática de la escasez hídrica en estas regiones, considerando que para generar 1 kg de hidrógeno se consumen entre 17-18 L de agua para la energía solar y 2 L para la eólica.

Se han propuesto tres principales fuentes de agua como opciones para abastecer esta industria: aguas superficiales y subterráneas, aguas tratadas y agua de mar o salobre. Aunque las aguas superficiales, como ríos y lagos, pueden considerarse similares al tratamiento de aguas residuales desde una perspectiva de tratamiento, los efectos antropogénicos y el cambio climático plantean desafíos que requieren una aproximación integral para garantizar un desarrollo sostenible de la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados, considerando factores tecnológicos, ambientales y sociales.

Hacia 2030, se proyecta que la industria del Hidrógeno Verde en Chile demandará unos 107 millones de metros cúbicos de agua destilada o desalinizada. Ante esta necesidad, se identifican tres fuentes de agua bruta: aguas subterráneas, aguas tratadas y agua de mar. La gestión sostenible es imperativa, considerando aspectos tecnológicos, ambientales y sociales.

El uso de aguas subterráneas o superficiales, como ríos y lagos, podría exacerbar la sensibilidad del territorio y generar posibles conflictos debido a la escasez de agua. En este contexto, la desalinización y la reutilización de aguas tratadas surgen como soluciones potenciales para abordar la disponibilidad hídrica en la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados.

La desalinización es un proceso mediante el cual el agua de mar o salobre se trata para convertirla en agua dulce apta para el consumo y otros usos. Los proyectos de desalinización buscan proporcionar agua potable o industrial, siendo una respuesta a la escasez hídrica y la necesidad de

abastecimiento en áreas con dificultades de acceso al agua dulce. A nivel comercial, se destacan tres tipos de procesos de desalinización, siendo el de Osmosis Inversa (OI) el más efectivo y en crecimiento.

Los procesos de desalinización involucran seis etapas principales: establecimiento, captación de agua, pretratamiento, desalinización, post tratamiento y descarga de aguas de rechazo. A nivel mundial, más de 13,000 plantas desalinizadoras utilizan el principio de Osmosis Inversa, representando el 69% de las plantas catastradas hasta 2019. En Chile, operan 22 plantas desalinizadoras con capacidad superior a 20 lt/s, principalmente para la minería (81% de la capacidad total), agua potable (14%) y uso industrial (5%). La región de Antofagasta lidera la producción nacional de agua desalinizada.

Para la industria del Hidrógeno Verde, se prevé que proyectos de desalinización utilicen agua de mar como fuente, produciendo 0.42 kg de agua desalinizada y 0.58 kg de salmuera por cada 1 kg de agua de mar captada. La producción de 35 kg de agua desalinizada para generar 1 kg de H₂ requerirá la extracción de 83 kg de agua de mar y generará 48 kg de salmuera como flujo residual. La desalinización se plantea como una solución para el abastecimiento de agua en el desarrollo de la industria del Hidrógeno Verde en Chile.

Además del agua de mar, la reutilización de aguas residuales sometidas a tratamiento adecuado ofrece una nueva fuente de recursos hídricos. Esto implica recircular aguas descartadas de diversos orígenes, como procesos industriales, uso doméstico o comercial, para su empleo en la producción de hidrógeno verde y derivados.

Chile cuenta con un alto grado de tratamiento de aguas residuales, aproximadamente el 99,98% de cobertura urbana, gracias a las 302 Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) en operación. Sin embargo, solo se reutiliza un 6% de estas aguas tratadas, lo que corresponde a unos 73 millones de metros cúbicos al año. Esta cifra indica una oportunidad para aprovechar el restante 94,2% de aguas residuales tratadas, permitiendo suministrar 1.152 millones de metros cúbicos anuales de agua bruta, equivalente a más de 4 veces el volumen del embalse El Yeso.

Para aprovechar las aguas tratadas provenientes de emisarios submarinos como fuente de agua bruta para la industria del Hidrógeno Verde y de sus derivados, es necesario someterlas a un proceso de tratamiento que cumpla con los parámetros establecidos. En este sentido, la tecnología de Osmosis Inversa es una opción viable, con un coeficiente de recuperación de 0,65. Esto significa que, por cada 1 kg de agua servida tratada, se obtendrían 0,65 kg de agua destilada lista para su uso en la industria del Hidrógeno Verde. No obstante, el caudal de aguas de rechazo resultante del proceso de desalinización dependerá de la calidad y cantidad del efluente, lo que plantea desafíos en relación con la normativa de calidad de aguas residuales y su impacto en el reúso para la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados.

En Chile existen 33 plantas de tratamiento de aguas servidas que utilizan emisarios submarinos, descargando el efluente en cuerpos de agua superficiales comúnmente con un tratamiento previo de separación de sólidos, presentando posibles amenazas ambientales. En la Región de Antofagasta el caudal medio de los emisarios submarinos representa más de 94 millones de metros cúbicos anuales, lo que representaría el 143% del requerimiento hídrico para la industria del

Hidrógeno Verde y sus derivados en esa zona al año 2030. En tanto en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena el caudal medio ronda los 8 millones de metros cúbicos anuales, lo que no cubriría más del 9% del consumo regional para la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados al 2030. Esto, promueve la posibilidad de contemplar a la desalinización de agua de mar y la reutilización de aguas servidas tratadas como tecnologías complementarias para la obtención del recurso hídrico en el desarrollo de la industria PtX.

Este informe proporciona una visión de la interacción entre el recurso hídrico y la producción de Hidrógeno Verde y derivados en Chile, resaltando la importancia de factores tecnológicos, ambientales y sociales para garantizar un desarrollo sostenible. Su enfoque lo convierte en una guía para orientar proyectos futuros de obtención de agua para la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados, contribuyendo al avance hacia una economía más sostenible y alineada con la lucha contra el cambio climático. Estos criterios deben abordar aspectos ambientales, protegiendo la vida marina y considerando los impactos de la desalinización, así como la gestión adecuada de residuos. Además, se busca evitar el estrés hídrico en las regiones involucradas, promoviendo fuentes de agua no convencionales y reutilización de efluentes cuando sea factible. En términos económicos, se deben considerar costos directos e indirectos, junto con beneficios sociales y ambientales para garantizar la rentabilidad de los proyectos. Desde una perspectiva social, se debe tener en cuenta la introducción de una nueva industria que depende del recurso hídrico, sin comprometer el acceso al agua de las comunidades locales, y buscando sinergias como desalinizadoras multipropósito o reúso de agua en la agricultura y el paisajismo.

Índice de contenidos

Resumen ejecutivo	3
Introducción	9
Objetivos y alcance	10
Objetivo	10
Alcance	11
Cuantificación del recurso hídrico	13
Generación eléctrica	14
Electrólisis	15
Síntesis.....	18
Fischer-Tropsch.....	19
Habber-Bosch.....	20
Conclusión del capítulo	21
Captación del recurso hídrico para Power-to-X.....	25
Desalinización y sus efectos.....	26
Procesos y tecnologías empleadas para desalinización	28
Captación de agua de mar para Power-to-X.....	34
Reutilización de aguas tratadas.....	36
Reúso de aguas servidas tratadas para Power-to-X	38
Conclusión del capítulo	39
Desafíos	42
Conclusión	43

Índice de la tabla

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua Tipo I y II norma ASTM D1193.....	16
Tabla 2. Operaciones de pretratamiento más utilizadas	30
Tabla 3. Coeficiente de recuperación para Osmosis inversa	35

Índice de figuras

Figura 1. Cadena de valor del Power-to-X	13
--	----

Figura 2. Consumo hídrico en la generación energética.....	15
Figura 3. Cantidad de agua destilada necesaria para producir hidrógeno	18
Figura 4. Aplicaciones de Hidrógeno Verde y sus derivados.....	21
Figura 5. Demanda estimada de agua por sector económico	22
Figura 6. Países con estrés hídrico	26
Figura 7. Tecnologías de procesos de desalinización	27
Figura 8. Operación para los procesos de desalinización.....	28
Figura 9. Presión osmótica en el proceso de desalinización	32
Figura 10. Esquema de un diseño típico de osmosis inversa.....	33
Figura 11. Esquema simplificado de proceso de desalinización	34
Figura 12. Cantidad de agua de mar necesaria para producir Hidrógeno [kg]	36
Figura 13. Volúmen de aguas tratadas por región	37
Figura 14. Cantidad de aguas servidas tratadas para producir hidrógeno [kg].....	39

1 Introducción



Fomentado por:



Ministerio Federal
de Economía
y Protección del Clima

en virtud de una decisión
del Bundestag alemán

Implementado por

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Introducción

Como establece en su sexto Informe de Evaluación (AR6) el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), “Las actividades humanas, principalmente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero, han causado inequívocamente el calentamiento global, con una temperatura de la superficie global que alcanzó 1,1°C por encima de 1850 - 1900 entre 2011- 2020”. Continúa además considerando que las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero han seguido aumentando, con contribuciones desiguales históricas y actuales derivadas del uso insostenible de la energía, el uso y cambio de uso de la tierra, los estilos de vida y las pautas de consumo y producción entre regiones, entre países y dentro de ellos (IPCC 2022).

Pero este reporte no viene sino a consolidar un conocimiento a esta altura asentado entre los distintos países. Al respecto, Chile se ha comprometido de manera ambiciosa con la acción climática estableciendo como meta alcanzar la carbono neutralidad en 2050 mediante la actualización de su Contribución Nacionalmente Determinada publicada en 2020 (NDC por sus siglas en inglés). Dentro de las medidas consideradas por el Gobierno de Chile para la articulación de la NDC se han establecido distintos ámbitos de acción que permitirían alcanzar la meta propuesta. Entre estos ámbitos, se identifica que el hidrógeno producido con fuentes renovables (o Hidrógeno Verde, H2V) tendrá un rol clave para el cumplimiento de la NDC (Gobierno de Chile 2020).

En virtud de lo anterior, y con el objetivo de impulsar el H2V y sus derivados en Chile se creó un consejo asesor para apoyar al Ministerio de Energía de Chile en la elaboración de una visión estratégica relacionada a la producción, uso y exportación del H2V y sus derivados. De esta manera, en noviembre de 2020 se publicó el documento de Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, apoyada por el consejo y diversos actores de la industria, academia, sociedad civil y sector público. En palabras planteadas por el consejo, se plantea: “La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde marca un punto de partida esencial para una transformación profunda de la identidad productiva del país”. La estrategia apunta de manera ambiciosa a tener a 2025 5 GW de capacidad de electrólisis construida y en desarrollo lo que producirá 200 kton H2V/año en al menos 2 polos en Chile. En este sentido, la estrategia propone activar la industria junto con seis pilares para su desarrollo, entre los que cabe destacar el uso equilibrado de recursos y territorio (Ministerio de Energía, Gobierno de Chile 2020).

Los principales polos de desarrollo que define la Estrategia están directamente relacionados al potencial de las energías renovables donde en el Norte de Chile se encuentra lo que la Estrategia define como “la radiación solar más alta del planeta”, alcanzando factores de planta de 35% para plantas fotovoltaicas monofaciales de seguimiento en 1 eje. Al mismo tiempo posiciona los vientos extremo Australes como una oportunidad única para la generación de electricidad renovables a través de turbinas eólicas de 120 metros de altura que pueden alcanzar factores de planta sobre 60%. Con lo anterior, el desierto de Atacama perteneciente a la región de Antofagasta y zonas australes de la región de Magallanes y de la Antártica Chilena se identifican como los principales polos de desarrollo para la producción de Hidrógeno Verde y sus derivados.

Pero no todos los escenarios son positivos para la producción de este vector energético ya que para producir H2 con energías renovables se requiere además una fuente de agua que abastezca el proceso de electrólisis, y es entonces donde la actividad antropogénica y el Cambio Climático se enfrentan con la posibilidad de desarrollo de esta naciente industria, ya que las regiones identificadas anteriormente se encuentran en escenarios de escasez hídrica presentando una brecha hídrica nacional, que se sitúa en 82,6 metros cúbicos por segundo (m^3/s), según cifras de la Dirección General de Aguas de 2015.

Al respecto, el Comité Científico de cambio Climático perteneciente al Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación del gobierno de Chile, en su informe Potencial Chileno para la Exportación de Energías Renovables establece que, “se espera que la mayor parte del hidrógeno verde producido en Chile utilice agua de mar como principal insumo para la electrólisis” (Palma-Behnke, et al. 2021).

Comprendiendo que el desarrollo de la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados en Chile apunta a una implementación mayormente localizada en las regiones de Antofagasta y de Magallanes y de la Antártica Chilena, ambas regiones encontrándose con decreto de escasez hídrica vigente, es necesario impulsar una combinación equilibrada y sostenible de fuentes hídricas, que permitan el desarrollo de la industria del H2V y sus Derivados en Chile con la menor cantidad de impactos negativos al territorio y sus comunidades.

En este contexto, el presente estudio busca comprender el impacto producido por el requerimiento hídrico de la industria del H2V y sus derivados en Chile, reconociendo como principales polos de desarrollo a las regiones de Antofagasta y de Magallanes y de la Antártica Chilena. Específicamente, se analizarán las tecnologías existentes que participarían en la cadena de valor del H2V y sus derivados, realizando una aproximación del requerimiento hídrico considerando como fuentes principales la desalinización de agua de mar y el reúso de las aguas servidas tratadas, lo anterior con el objetivo de ofrecer alternativas de obtención de insumo hídrico a la vez que se consideran sus impactos directos e indirectos en vista a la construcción de criterios ambientales, económicos y sociales para la implementación de proyectos de obtención de recurso hídrico para el desarrollo del H2V y sus derivados.

Objetivos y alcance

Objetivo

El objetivo principal del estudio es comprender aspectos sociales, técnicos y ambientales en la elaboración de criterios para la implementación de proyectos de obtención de recurso hídrico en el desarrollo del H2V y sus derivados en Chile, particularmente en las regiones de Antofagasta y de Magallanes y de la Antártica Chilena.

Se consideran los siguientes objetivos específicos:

1. Cuantificar la necesidad de recurso hídrico en general para el desarrollo del H2V y sus derivados con relación a las proyecciones en Chile y en especial para las regiones de Antofagasta y de Magallanes y de la Antártica Chilena.

2. Identificar posibles alternativas de aprovechamiento del recurso hídrico para el desarrollo del H2V y sus derivados en las regiones de Antofagasta y de Magallanes y de la Antártica Chilena.
3. Reconocer y analizar el impacto social y ambiental de tecnologías existentes para desalinización y reutilización de aguas de desecho para la producción de H2V y sus derivados.

Alcance

El trabajo realizado entonces permitirá, teniendo en cuenta los aspectos analizados, generar y proponer criterios sociales, ambientales y económicos que enfoquen el desarrollo de futuros proyectos de producción de Hidrógeno Verde y sus derivados a una disminución de impactos y generación de beneficios en estas aristas sustentables. Por lo tanto, este informe apunta a una proyección que contempla la creación futura de proyectos de implementación contextualizados especialmente a la escasez hídrica vigente en ambas regiones estudiadas.

2

Cuantificación del recurso hídrico



International
PtX Hub

Fomentado por:



Ministerio Federal
de Economía
y Protección del Clima

en virtud de una decisión
del Bundestag alemán

Implementado por

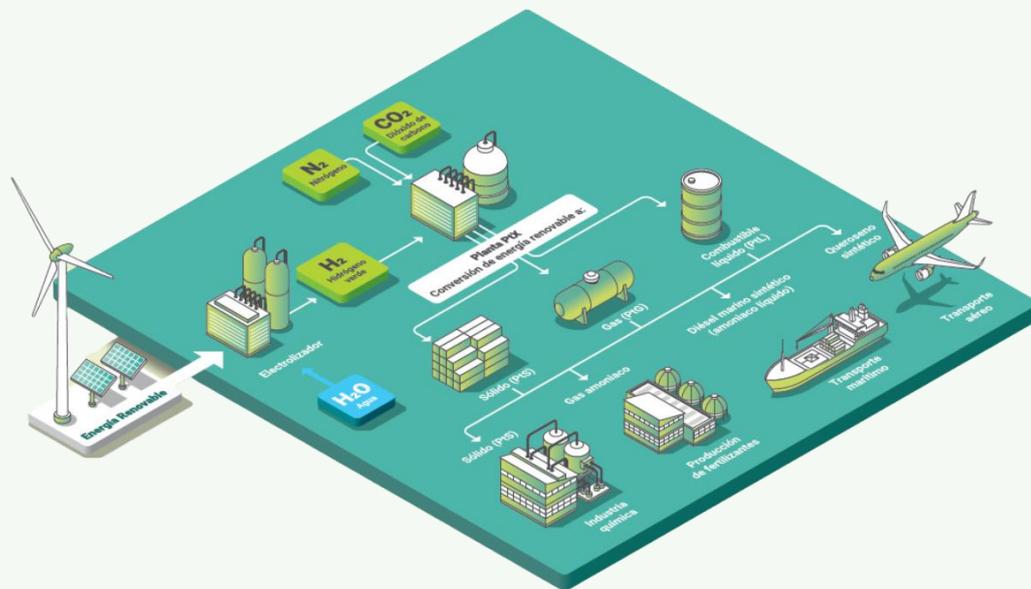
giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Cuantificación del recurso hídrico

La oportunidad de desarrollo hacia la generación de combustibles con emisiones de carbono próximas a cero o nulas, y la rápida exploración y crecimiento que se prevé para el Hidrógeno Verde y sus derivados, permitirán que el hidrógeno empiece a sustituir a los combustibles más convencionales. Al respecto, las fuentes de energía de origen renovable, el uso, la demanda y la gestión del agua serán consideraciones cada vez más importantes. Los promotores de proyectos de hidrógeno y el sector del agua deberán adoptar un enfoque integrado y estudiar detenidamente las implicaciones hídricas de la producción de hidrógeno. Por lo anterior, es necesario cuantificar el requerimiento hídrico en el desarrollo de la industria del H₂V y sus derivados reconociendo las distintas tecnologías que interactúan en su cadena de valor la que describe desde el proceso de obtención de los recursos involucrados, ya sea la generación eléctrica y la obtención de recurso hídrico, como también la captación de dióxido de carbono y nitrógeno para los productos Power-to-X. Asimismo, la cadena describe el uso final en distintas aplicaciones, detallando en cada etapa los procesos o sistemas involucrados, mostrando diversos caminos o rutas de este vector energético.

Con lo antedicho, el análisis generado en este estudio se realiza tomando como referencia la cadena de valor del Hidrógeno Verde y de sus derivados elaborada por el PtX Hub International que se muestra en la **Figura 1**.

Figura 1. Cadena de valor del Power-to-X



Fuente: International Power-to-X Hub (2023).

Al respecto, es posible comprender el proceso de producción de H₂V y sus derivados subdividiéndolo en 3 etapas principales:

Generación eléctrica: En la primera etapa están los proyectos de generación de energías renovables, los que pueden comprender fuentes de energía eólica, solar fotovoltaica, concentración solar, hidráulica, biomasa o termólisis del agua con obtención directa de hidrógeno mediante la aplicación de calor, etc. Asimismo, se debe considerar la transmisión eléctrica que evacúa la energía generada, pudiendo referirse a configuraciones soterradas o no soterradas, y la implementación de subestaciones eléctricas que interconectan la fuente de energía para el suministro de la planta electrolizadora y los sistemas auxiliares contemplados.

Electrólisis: La segunda etapa de la cadena de valor de H₂V y sus derivados corresponde a la producción de hidrógeno, proceso llevado a cabo principalmente mediante electrólisis, donde la energía eléctrica se utiliza para dividir las moléculas de agua generando hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂). El hidrógeno puede utilizarse directamente en aplicaciones industriales, celdas de combustibles y combustión.

Síntesis PtX: Además, la tercera etapa de la cadena de valor de H₂V y sus derivados corresponde a la combinación del hidrógeno con otras moléculas para crear compuestos derivados. Por ejemplo, se combina con nitrógeno (N₂) capturado del aire mediante el proceso de Adsorción por oscilación de presión (PSA por sus siglas en inglés) para producir amoníaco (NH₃), o con dióxido de carbono (CO₂), capturado del aire mediante Captura directa del aire (DAC por sus siglas en inglés) para producir combustibles líquidos como gasolina, Diesel, queroseno y metanol (CH₃OH), o gases como el metano (CH₄).

De forma paralela a las etapas expuestas, la captación de agua a través de fuentes convencionales o no convencionales realiza un punto de especial relevancia para la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados ya que, las 3 etapas principales desde la conversión energética hasta el hidrógeno verde y sus derivados emplean agua en su proceso.

Con el objetivo de cuantificar de manera aproximada el requerimiento hídrico para la cadena de valor de la producción de H₂V y sus derivados, se realiza el cálculo mediante las tecnologías más utilizadas en cada una de las etapas del proceso.

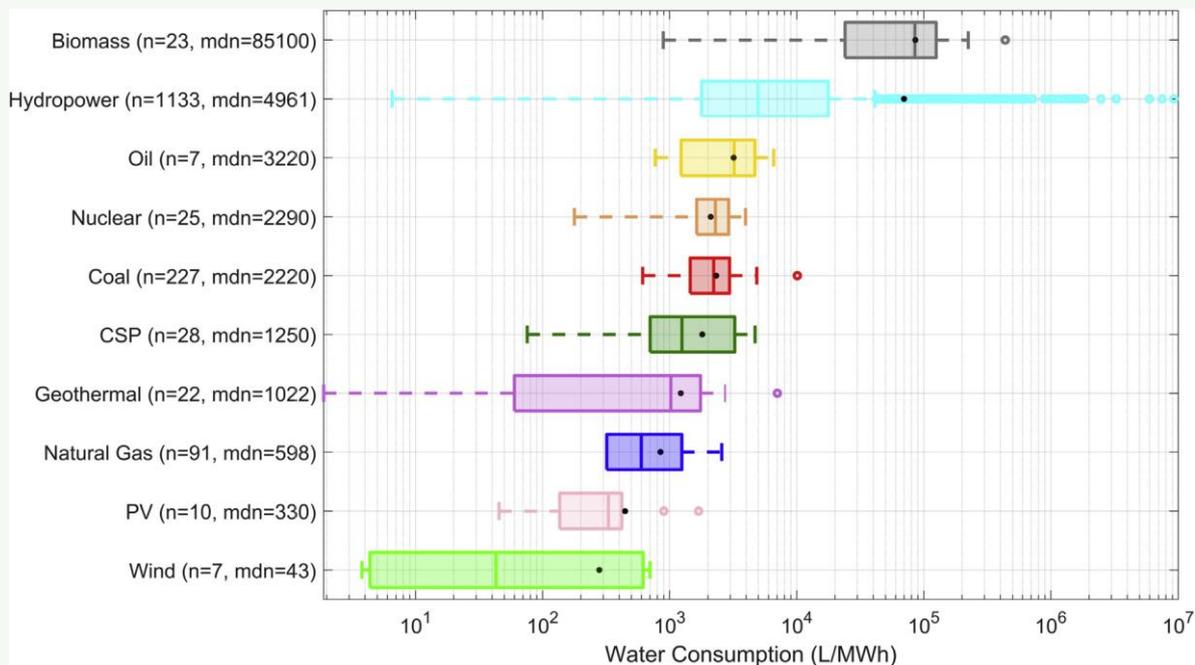
Generación eléctrica

La producción de hidrógeno a través del proceso de electrólisis se remonta hasta principios de 1800. Sin embargo, es en la actualidad que este método de producción ha cobrado relevancia, debido principalmente a la reducción de costos de la tecnología asociada a la electrólisis del agua como también los costos de la energía renovable, donde la energía solar ha reducido sus costos en más de un 80% desde el año 2010 y los costos de la energía eólica se han reducido cerca de un 40% en el mismo periodo (IRENA 2021).

Para que el hidrógeno sea considerado verde debe ser producido por electricidad de origen renovable. Comúnmente, esta etapa del proceso no se considera para mencionar cuanta agua requeriría el proceso de electrólisis, pero siendo una etapa fundamental para la alimentación

energética del electrolizador, es que es relevante considerar su huella hídrica. Por esto, con la información extraída de la **Figura 2**, es posible concluir que se requieren en promedio 330 L/MWh para generación de energía fotovoltaica y 43 L/MWh en promedio para la generación de energía eólica.

Figura 2. Consumo hídrico en la generación energética



Fuente: (Jin, et al. 2019)

Si se considera que las estimaciones para para generar 1 kg de H_2 señalan que se consumen entre 50 y 55 kWh de energía (IRENA 2020) , esto significaría un consumo entre 17 y 18 L de H_2O para producir la energía fotovoltaica y entre 2 L de H_2O para producir la energía eólica requerida. Esta estimación de consumo energético se centra en el proceso de electrólisis, por lo que es posible que sea un cálculo subdimensionado que no considera la captación y uso de agua, ni la síntesis de derivados del Hidrógeno Verde.

Electrólisis

El hidrógeno se puede producir a partir de múltiples fuentes de energía. En tanto si se refiere a Hidrógeno Verde, la energía empleada para la producción del hidrógeno debe provenir de energías renovables. Al respecto, la ruta electrolítica permite dividir el agua en oxígeno e hidrógeno mediante el uso de electricidad.

El consumo de agua en el proceso de electrólisis entonces se realiza para la producción de hidrógeno, que desde un cálculo estequiométrico son necesarios 9 kg de agua por 1 kg de H_2 . Sin

embargo, según datos obtenidos del National Renewable Energy Laboratory, la eficiencia de conversión del agua a hidrógeno en distintos electrolizadores oscila entre el 80% y el 95%, por lo que es esperable que el consumo hídrico oscile entre 9,5 y 11 litros.

Si bien el consumo de agua está identificado principalmente para la producción de hidrógeno en el proceso de electrólisis, la refrigeración de los sistemas de electrolización también es un factor que se debe considerar. Al respecto, los proyectos que consideran sistemas de refrigeración pueden basarse en refrigeración seca, en la integración de calor residual de otros sistemas de infraestructura basados en agua, o directamente en sistemas de refrigeración basados en agua (EUROWATER 2022). En cualquier caso, el diseño específico de la solución de refrigeración determinara el uso del agua para este aspecto.

Si se considera un electrolizador de membrana de intercambio protónico (PEM), este puede alcanzar eficiencias energéticas en torno al 80% (Sachverständigenrat für Umweltfragen 2021), lo que en el caso de un electrolizador PEM de 1 MW de capacidad de electrolización podría producir 18,2 Kg de H_2 por hora, consumiendo 400 litros de agua para la refrigeración del electrolizador (EUROWATER 2022). Esto implica que para el sistema de enfriamiento se requeriría aproximadamente el doble de agua de la requerida para la electrólisis.

Hasta este punto se ha considerado el recurso hídrico sin una calidad específica para cada proceso, lo que sin duda es un análisis que no detalla las diferencias que existen entre el uso del agua justo antes de entrar al electrolizador y la fuente de agua bruta sin tratar.

Las condiciones del agua de refrigeración pueden considerarse como base en el requerimiento hídrico, por lo que esta debe presentar condiciones de limpieza y libre de bacterias (menos de 100 CFU/ml) (IBM 2021), haciendo posible asumir que el agua debe encontrarse desmineralizada o destilada.

Para la producción de hidrógeno en tanto, se presenta un escenario diferente. Como establece la norma ASTM D1193, se requiere una calidad de agua “Tipo I o II” que tiene límites establecidos de acuerdo con los parámetros presentados en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua Tipo I y II norma ASTM D1193

Parámetros	Unidad	Tipo I	Tipo II
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$ @ 25 °C	< 0,056	< 0,25
Resistividad eléctrica	$\text{M}\Omega\text{-cm}$ @ 25 °C	> 18	> 1,0
Carbono orgánico total (TOC)	$\mu\text{g}/\text{L}$	< 50	< 200
Sodio (Na)	$\mu\text{g}/\text{L}$	< 1	< 5

Cloro (Cl)	µg/L	< 1	< 5
Silice	µg/L	< 3	< 500
pH	-	-	-

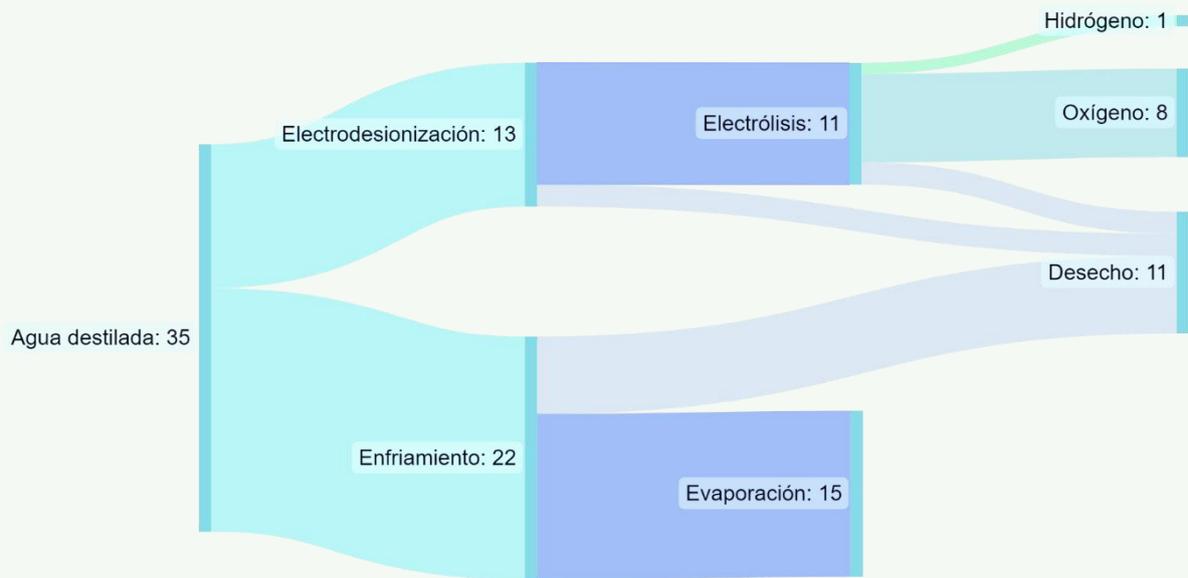
Fuente: (ASTM D1193)

Los requerimientos de calidad de agua establecidos para el correcto funcionamiento y no deterioro de los componentes del electrolizador plantean la necesidad de generar un tratamiento previo al ingreso del recurso hídrico al electrolizador, que si considera como base el agua desmineralizada se debe realizar un tratamiento de desionización para lograr los parámetros de conductividad y resistividad eléctrica que señala la norma. Las opciones de tratamiento en este caso permiten la utilización de un lecho mixto o una unidad de electrodesionización (EDI). Estos procesos intercambiarán los iones restantes por iones H⁺ y OH⁻. Un método usual, es la utilización de ambas tecnologías de desionización situando el lecho mixto a continuación del EDI. En este caso, cerca del 15% del agua empleada es desechada (EUROWATER 2022).

Además, si se considera el agua que se requiere para la ejecución del proceso de electrólisis, entre el 5% y el 20% del agua inyectada al electrolizador es desechada debido principalmente a la eficiencia del proceso. De la misma forma, si pensamos en un sistema de refrigeración para el electrolizador basado en agua las pérdidas por evaporación en el sistema representan el 43% del requerimiento del recurso hídrico.

El diagrama de Sankey presentado a continuación, presenta el consumo de recurso hídrico presente en el proceso de electrolización asumiendo como calidad de agua base la necesaria para el sistema de enfriamiento como muestra la **Figura 3**.

Figura 3. Cantidad de agua destilada necesaria para producir hidrógeno



Fuente: Elaboración propia.

Con lo anterior entonces, es posible concluir que para producir 1 kg de H₂ mediante el proceso de electrolización PEM, considerando una eficiencia hídrica del 80% para electrólisis, un sistema de enfriamiento basado en agua y un pretratamiento de electrodesionización que utilice el EDI y el lecho mixto, serán necesarios 35 litros de agua destilada o desmineralizada en la etapa de electrolización, a lo que se debiera agregar el consumo específico de cada tecnología de producción de energía renovables, evaluada en este estudio para los casos solares y eólicos.

Síntesis

Si bien el Hidrógeno tiene múltiples aplicaciones directas que pueden aportar en la reducción de gases de efecto invernadero, por ejemplo para la producción de energía eléctrica a través de Celdas de Combustible estacionarias o para la producción de acero mediante el método de reducción directa del hierro (RDI) que reemplaza el uso de carbón en la industria, para lograr una transición exitosa hacia una economía y una sociedad neutrales al clima y desfosilizada, se plantea la necesidad de aplicar tecnologías Power-to-X que conviertan la energía renovable en moléculas que pueden usarse como combustibles carbono neutrales y materias primas en la industria y el transporte.

Con lo anterior el H₂V es el centro de Power-to-X, ya que sirve como insumo para la producción, reconociendo la síntesis y refinación agregando por ejemplo CO₂ o N₂. Lo anterior, permite la producción de vectores energéticos como el keroseno, gasolina, diésel, metanol (CH₃OH) en el

caso de Power-to-Liquid; el metano (CH_4) en el caso de Power-to-Gas, o amoníaco (NH_3) en el caso de Power-to-Chemicals.

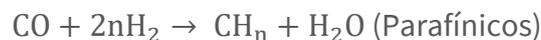
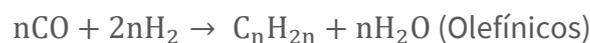
Fischer-Tropsch

El proceso Fischer-Tropsch consiste en la reacción de síntesis de hidrocarburos líquidos a partir de una mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2). Esta mezcla, continúan, se obtiene típicamente a través de la gasificación de materiales como carbón, biomasa o reformado del gas natural, pero con el desarrollo de la industria del Hidrógeno Verde, se presenta la oportunidad, no solo de producir el hidrógeno necesario como gas de síntesis para al proceso con una reducida o nula huella de carbono, sino capturar el dióxido de carbono (CO_2) presente en procesos industriales inevitables o a través de la captura directa del aire. Como resultado, se obtendrá un hidrocarburo sintético carbono neutral (Santos-Carballal, Cadi-Essadek y de Leeuw 2021).

Considerando las condiciones necesarias para el proceso una parte del CO_2 primero se transforma en CO que es más activo para producir hidrocarburos mediante las reacciones Fischer-Tropsch. Esta reacción se muestra en la siguiente ecuación.



Producto de esta reacción se produce agua la que debe ser eliminada. Posteriormente, tras el enfriamiento, los gases de síntesis son enviados al reactor de síntesis, donde se produce la hidrogenación del CO_2 y CO lo que produce hidrocarburos de valor añadido mostrados en las siguientes ecuaciones.



Al término del proceso los productos derivados, que incluyen hidrocarburos ligeros y agua se enfrían y separan para obtener el producto de alto contenido calórico. A menudo, estos productos requieren procesos de separación, destilación y tratamiento para obtener los productos finales, como gasolina, diésel, aceites lubricantes, etc. (Gao, et al. 2021).

Como se evidencia de lo anterior, la presencia de agua tanto en el producto de la reacción Fischer-Tropsch, como en los procesos de enfriamiento es esencial para obtener la distribución óptima de productos deseados, manteniendo las condiciones adecuadas de hidratación y temperatura que garanticen la eficiencia de la reacción.

La cantidad de agua que se requiera para el proceso dependerá en primer lugar, del sistema de enfriamiento que se utilice, como también de la configuración de reactores para la producción. Esto último condicionará la eficiencia del proceso, lo que se relaciona con la producción de agua como subproducto del proceso Fischer-Tropsch (Kamkeng y Wang 2023).

Si bien como se señala, este proceso de forma residual produce agua, esta se compone de distintas trazas de alcoholes que, aunque no superan el 2% no permite su aprovechamiento directo, catalogándola entonces como un residuo que debe ser dispuesto de forma adecuada.

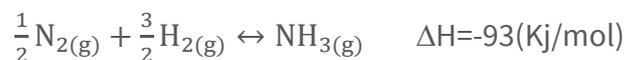
En conclusión, el uso del agua en la producción de combustibles sintéticos mediante el proceso Fischer-Tropsch es esencial tanto para la generación de hidrógeno como para influir en las reacciones Fischer-Tropsch en sí. El control preciso de la cantidad y distribución del agua en las diferentes etapas del proceso es crucial para garantizar la eficiencia y la selectividad deseada en la producción de productos finales. Si bien es esencial comprender el requerimiento hídrico de estos procesos, el análisis actual no permite las variaciones de este versátil proceso, por lo cual no será considerado para el análisis del requerimiento hídrico.

Haber-Bosch

Tal como se presenta la oportunidad de desarrollar hidrocarburos sintéticos a base de hidrógeno verde y dióxido de carbono proveniente de fuente inevitables, el hidrógeno también puede ser empleado junto al nitrógeno para la producción de el segundo producto químico más producido en el mundo, alcanzando los 235 millones de toneladas de producción mundial en 2019 (Ghavam, et al. 2021). Lo anterior se refiere al amoníaco o NH_3 . Este producto químico se posiciona con un importante rol en la industria agrícola, principalmente para la producción de fertilizantes, pero también para la producción de poliimidias, ácido nítrico, nylon, productos farmacéuticos, explosivos, refrigerantes, colorantes, soluciones de limpieza y otros productos químicos industriales. Otras aplicaciones más recientes incluyen el uso del amoníaco como portador de energía para el almacenamiento y transporte de energía, siendo esto particularmente atractivo para la transición mundial de los combustibles fósiles a fuentes de energía renovables variables, como la solar y la eólica, ya que aumenta la necesidad de soluciones de almacenamiento de energía que puedan cubrir diversos plazos para almacenar la energía (CICE 2016).

Actualmente el método de producción de amoníaco más utilizado es el proceso Haber-Bosch, el cual utiliza un catalizador hecho de hierro o rutenio con una temperatura de más de $426^{\circ}C$ y una presión de más de 200 bar donde ingresa el nitrógeno y el hidrógeno. Luego, estos elementos salen del catalizador para entrar en reactores industriales donde los elementos se convierten en amoníaco fluido (Ghavam, et al. 2021).

Con lo anterior entonces, el amoníaco es el resultado de la reacción exotérmica entre el hidrógeno y el nitrógeno, según se muestra en la siguiente ecuación de equilibrio:

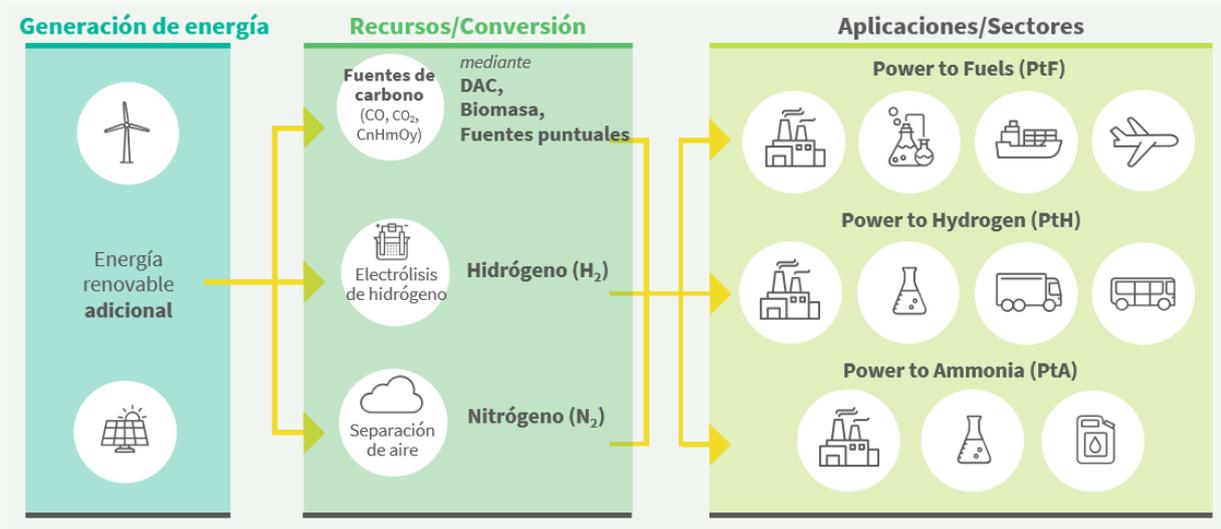


Desde la perspectiva del consumo hídrico específico para el proceso de síntesis de amoníaco sintético, la reacción no requiere moléculas de agua, ni genera en su reacción moléculas de agua en ningún estado, a diferencia del proceso Fisher-Tropsch.

Tanto el proceso Fisher-Tropsch como el proceso Haber-Bosch permiten la síntesis de productos que pudieran usarse directamente, o ser transformados para su uso final. Es esperable que para la producción de estos usos finales el consumo hídrico de toda la cadena de producción aumente,

pero dependerá de cada caso, uso y aplicación tanto de los hidrocarburos sintéticos y del amoníaco sintético, ambos derivados del hidrógeno como muestra la **Figura 4**.

Figura 4. Aplicaciones de Hidrógeno Verde y sus derivados



Fuente: (PtX Hub International 2022).

Conclusión del capítulo

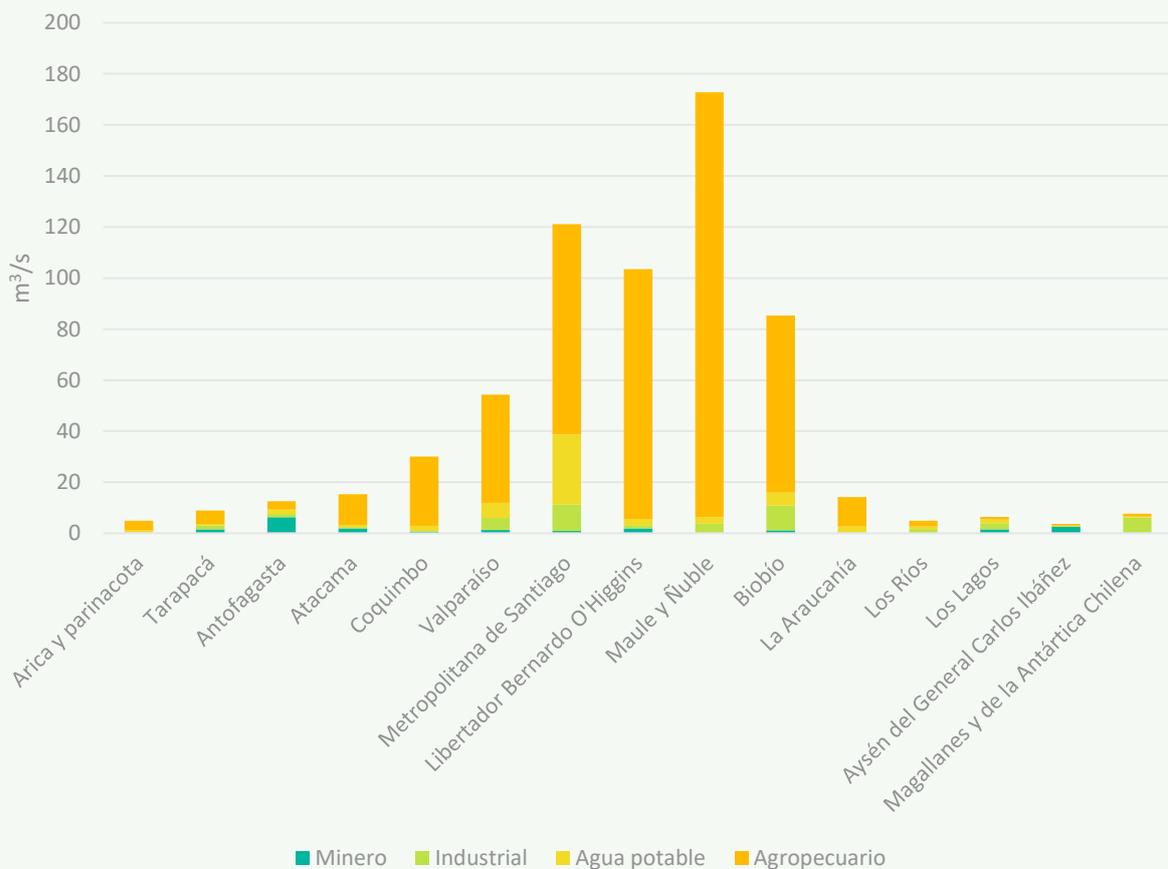
Como ya se ha expuesto, para la producción de 1 kg de H₂ a través de la electrólisis del agua, requeriría 35 kg de agua destilada, sin considerar el consumo de la generación de energía a base eólica o fotovoltaica, esto representa un consumo de al menos 4 veces más que si se considera únicamente los 9 kg de agua que se requerirían estequiométricamente para la producción de cada kg de hidrógeno a través de electrólisis.

En Chile actualmente son variados los proyectos que han sido anunciados y que tienen relación con la cadena de valor del Hidrógeno verde y de sus derivados. Pese a lo anterior se han identificado 31 proyectos a lo largo de todo el territorio, contabilizando 11 proyectos en la Región de Antofagasta y 8 proyectos en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Estos proyectos se encuentran en distintas etapas de desarrollo, desde una etapa conceptual, hasta la fase de pilotaje, y plantean el inicio de operaciones a más tardar al 2030, reconociendo además distintas etapas de puesta en marcha. Aun así, es posible reconocer que estos 31 proyectos al año 20230, representarían una producción anual de 3 megatoneladas de Hidrógeno Verde, el que sería utilizado para distintos propósitos como síntesis de ecombustibles, amoníaco, netbilling, entre otros.

Sabiendo entonces cuanto hidrógeno se pretende consumir podemos reconocer, basando el cálculo en el supuesto de 35 kg de agua destilada o desalinizada por cada kg producido de H₂, que para el año 2030 la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados representará un consumo de 107 millones de metros cúbicos de agua destilada o desalinizada (ver Anexo A).

El consumo hídrico en Chile al año 2016 estaba representado en un 72% por la agricultura, cerca del 12% por la industria sanitaria, un 7% por la industria y un 4% por la minería. Estos consumos se encuentran distribuidos a lo largo del territorio nacional, concentrando el mayor consumo de la agricultura entre la Región de Coquimbo y la Región del Biobío, como se aprecia en la **Figura 5**.

Figura 5. Demanda estimada de agua por sector económico



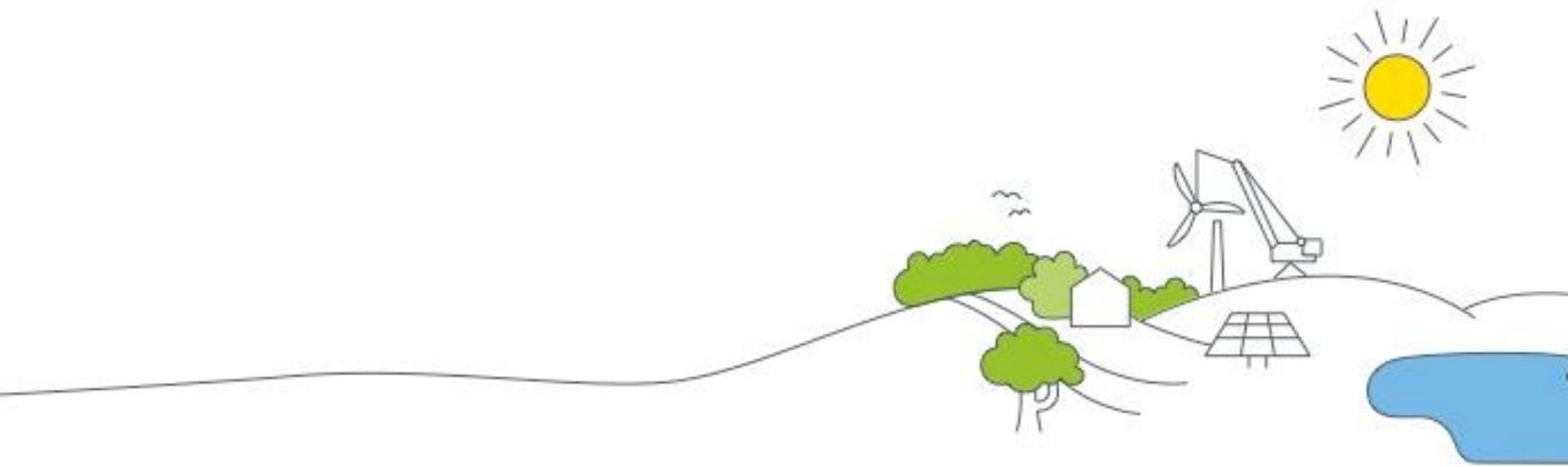
Fuente: Elaboración propia en base a información de (DGA 2016).

Según datos de la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), con datos a cierre de 2020, el consumo total de recursos hídricos en la minería llegó a 12.089 litros por segundo, lo que representaría 381 millones de metros cúbicos por año (Peña 2021). Si se reconoce que este consumo representa al 4% del consumo total nacional, es posible deducir que el consumo que represento el sector de la agricultura para el mismo periodo fue cercano a los 6.800 millones de metros cúbicos.

Con lo anterior, la proyección esperada de demanda de agua en la minería del cobre al 2030, muestra un consumo de 22,3 metros cúbicos por segundo, lo que representa un consumo por año de 706 millones de metros cúbicos (COCHILCO 2022). Como se mencionó anteriormente el consumo esperado para ese periodo, representado por la industria del Hidrógeno Verde y de sus derivados, sería cercano a los 107 millones de metros cúbicos, que representa no más del 15% del consumo proyectado para la minería.

El desarrollo de la industria del Hidrógeno Verde y de sus derivados, no representaría un uso extensivo de los recursos hídricos en Chile, si se compara con otros usos actuales o futuros de los sectores mineros o agropecuarios. Aún así, la brecha hídrica promedio a nivel nacional es de 2600 millones de metros cúbicos al año y se espera que esa cifra aumente a 4700 millones de metros cúbicos anuales para el 2030 (Fundación Chile 2018). Este dato toma relevancia al considerar la instalación de una industria consuntiva de recurso hídrico.

Por lo anterior, es importante reconocer los costos y beneficios, tanto sociales como ambientales que de forma directa o indirecta provocaría el desarrollo de proyectos de obtención del recurso hídrico para la industria del Hidrógeno Verde y de sus derivados.



3

Captación del recurso hídrico para Power-to-X

Captación del recurso hídrico para Power-to-X

Como se evidenció en el capítulo anterior, el recurso hídrico participa prácticamente en toda la cadena de valor del Power-to-X, desde la generación eléctrica hasta la síntesis de los derivados del Hidrógeno. Lo antedicho, realza la necesidad de contar con una fuente de agua que pueda abastecer la nascente industria y permita el desarrollo de plantas de producción de Hidrógeno Verde y sus derivados.

Al respecto, se han planteado 3 principales fuentes de donde obtener el recurso hídrico considerando estas como “agua bruta”, las que pudieran caracterizarse como aguas subterráneas; las aguas tratadas, y el agua de mar o salobre. Desde el punto de vista de un sistema de tratamiento de aguas, las aguas superficiales, ya sea de ríos o lagos son en muchos aspectos similares al tratamiento de las aguas residuales por lo que pudieran considerarse como una sola (EUROWATER 2022). Pero es entonces que los efectos antrópicos y del cambio climático presentan desafíos que desde el punto de vista de la disponibilidad de agua es necesario abordar para considerar un desarrollo sostenible de la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados, reconociendo no solo los factores tecnológicos del proyecto, sino también sus impactos ambientales y sociales.

Así, datos de las Naciones Unidas evidencian que, durante 2022, más de 2.300 millones de personas se enfrentaron a una situación de estrés hídrico (Naciones Unidas 2022), lo que fragilizó la disponibilidad de agua tanto para usos urbanos y rurales. Este escenario es gatillado fuertemente por una sequía meteorológica que azota a determinados territorios del mundo. En este sentido, la mayoría de las regiones con el mayor potencial eólico y solar para la generación de electricidad renovable e hidrógeno ya se enfrentan a un grave estrés hídrico como muestra la **Figura 6**. Entre los países mencionados destaca Chile por ser un territorio que mayoritariamente presenta sensibilidad ante la pérdida de seguridad hídrica urbana y rural a nivel doméstico, ya que presenta condiciones demográficas, socioeconómicas y de infraestructura hídrica que aumentan la susceptibilidad del territorio a sus impactos adversos en su seguridad hídrica doméstica (SNU 2021).



Figura 6. Países con estrés hídrico

Fuente: (IRENA 2022).

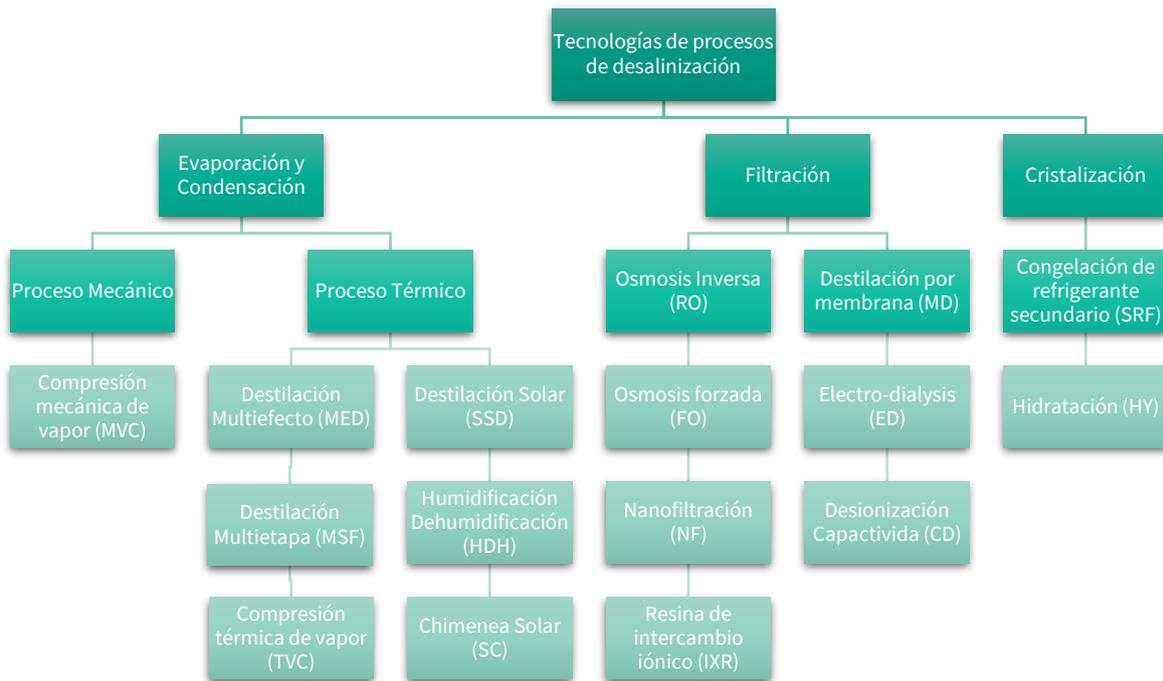
Es en este contexto entonces que considerar el uso de aguas subterráneas, o aguas superficiales, proveniente de ríos o lagos, suma condiciones de sensibilidad, lo que podría ocasionar conflictos potenciales a causa de este recurso. Lo anterior ofrece la oportunidad de evaluar posibles soluciones como la desalinización y la reutilización de aguas tratadas.

Desalinización y sus efectos

La desalinización es el proceso por el cual el agua de mar (o agua salobre) disminuye su concentración de sales o se separa de éstas, hasta convertirse en agua dulce, apta para el consumo de agua potable y otros usos domésticos (Vicuña, et al. 2022). Un proyecto de desalinización consiste en el tratamiento del agua de mar o agua salobre a través del cual se obtiene agua potable o agua industrial. En general, su objetivo es abastecer a la población con dificultades de acceso al agua dulce, así como a distintos rubros o procesos productivos disminuyendo con ello el impacto de las actividades vinculadas a la extracción de aguas continentales superficiales y subterráneas (Servicio de Evaluación Ambiental 2023).

La desalinización a escala comercial se base en tres principales tipos de procesos o gradientes de clasificación de acuerdo con el principio de funcionamiento como se muestra en Figura 7. Entre los múltiples procesos, el más destacado es el de Osmosis Inversa (OI), que resulta también la tecnología de proceso de membranas más efectiva (Khan, Rehman y Al-Sulaiman 2018).

Figura 7. Tecnologías de procesos de desalinización

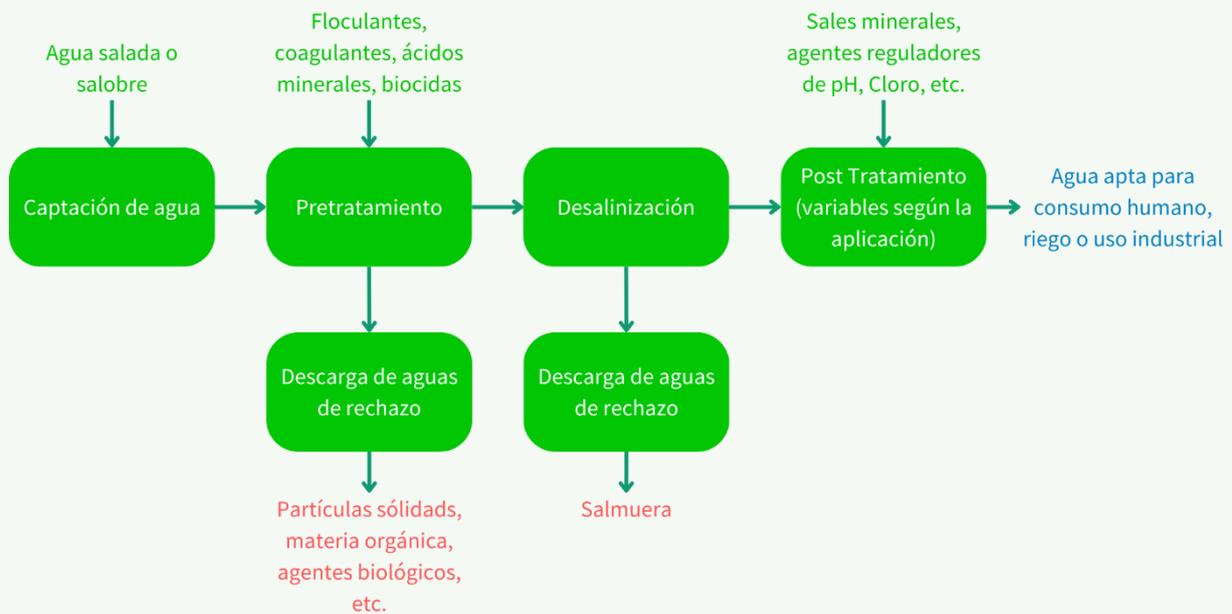


Fuente: Elaboración propia en base a información de (Curto, Franzitta y Guercio 2021).

Si bien el principio de operación para los procesos de desalinización es variado, cualquiera de estos procesos implica la presencia de seis etapas principales: i) establecimiento; ii) captación de agua; iii) pretratamiento; iv) desalinización; v) post tratamiento, y vi) descarga de aguas de rechazo. La **Figura 8** muestra un diagrama con las etapas de un proceso estándar de desalinización, reconociendo además los flujos materiales de entrada y salida de cada operación.



Figura 8. Operación para los procesos de desalinización



Fuente: Elaboración propia en base a información de (ONG FIMA 2023)

A nivel mundial se reconoce que más de 13.000 plantas desalinizadoras operan con el principio de Osmosis Inversa, lo que representa el 69% del total de plantas desalinizadoras catastradas al 2019, de las cuales un 34% son alimentadas con agua de mar (SW por sus siglas en inglés) (Jones, et al. 2018).

En Chile actualmente se encuentran en operación 22 plantas desalinizadoras con capacidad mayor a 20 lt/s, 6 se encuentran en etapa de construcción, 3 con aprobación ambiental y 12 en evaluación preliminar. Además, la capacidad actual del total de plantas de agua desalinizada en operación es de 8.200 lt/s, la cual llegaría a los 25.000 lt/s si todos los proyectos se realizan para el año 2028 (ACADES; Consejo Minero; Comité Científico de Cambio Climático 2023).

El uso de la desalinización en el país se concentra principalmente en la minería, representando el 81% de la capacidad de desalinización actual, seguido por su uso para agua potable con un 14% y para uso industrial con un 5%. Si se refiere a producción actual de agua desalinizada por regiones, Antofagasta concentra el 79% de la producción nacional con más de 6 m³/s, mientras que la región de Magallanes y de la Antártica Chilena no supera el 1% con solo 0,063 m³/s. Los datos evidenciados revelan la experiencia de cada territorio en la aplicación de tecnologías de desalinización (ver Anexo B).

Procesos y tecnologías empleadas para desalinización

Para comprender de mejor manera el proceso de desalinización y cada una de sus etapas a continuación se describen los principales procesos y tecnologías empleadas, y como puede ser

incluido este proceso de producción de recurso hídrico para el desarrollo de la industria del Hidrógeno Verde y de sus Derivados en Chile.

Captación de agua

En el proceso de desalinización el agua cruda debe ser extraída desde los distintos orígenes posibles (napas subterráneas, playas, etc.). La instalación se compone principalmente por bombas y tuberías que extraen el agua de la fuente ya sea marina o salobre.

Las tomas de alimentación, que se encargan de la extracción de agua se pueden clasificar en dos grandes grupos: tomas de superficie y tomas subsuperficiales.

Dependiendo de la batimetría del sitio las tomas superficiales se ubican varios cientos de metros o hasta un kilómetro cuando son instalados mar adentro, variando además la profundidad de la toma. El terminal de la toma consiste en un vástago vertical que está normalmente protegido con una red gruesa y/o con una tapa que controla la velocidad de admisión. De esta forma, el agua que entra en la estructura se bombea a la costa a través de un ducto o túnel (generalmente de concreto, polímeros de fibra reforzada o polietileno de alta densidad) anclado al fondo marino con estructuras de concreto. Usualmente la porción del ducto en la zona de oleaje está enterrada bajo el fondo, pero métodos como la tunelización, micro tunelización o perforación direccional horizontal permiten instalad ductos sin cavar una zanja en el fondo marino (Vicuña, et al. 2022) .

La tapa de velocidad se ubica encima del vástago de entrada y es la encargada de producir un cambio de dirección repentino en el flujo de admisión, pasando de vertical a horizontal.

En tanto las tomas subsuperficiales se utilizan para extraer agua salada por debajo de la zona de interfase agua dulce-agua marina o agua salobre desde las cotas hidráulicas correspondientes a cada acuífero, ya sea a través de pozos verticales, horizontales o en ángulo, galerías o sistemas de infiltración.

En Chile, la captación de agua se realiza entre 400 y 600 metros de la costa, ubicando siempre la toma por debajo de los 20 metros de profundidad, punto donde la temperatura cambia rápidamente debido a la ausencia de rayos de luz directa proveniente del sol. Este punto se conoce como termoclina y marca una diferencia en la distribución de nutrientes y el oxígeno del océano. Posicionar la toma de agua por debajo de la termoclina evita la absorción de fitoplancton y otros organismos fotosintéticos que producen el oxígeno y nutrientes, los que son transportados hacia abajo para ser consumidos por otros organismos marinos.

Pretratamiento

A pesar de la protección que existe en la captación de agua, que evita que ingresen cuerpos no deseados al sistema, las mallas protectoras no pueden tener aberturas inferiores a 5 centímetros de diámetro, ya que aumenta la probabilidad de que se provoquen obstrucciones que pudieran entorpecer el proceso. Por esto, es común que el agua ingresada contenga ciertos elementos en el agua como sedimentos y sólidos suspendidos, partículas coloidales y materia orgánica, además de compuestos químicos reactivos y presencia de microorganismos.

Con lo anterior, se hace necesario un pretratamiento de las aguas que ingresan al sistema con el objetivo de incrementar el rendimiento de la planta, mejorando la calidad del agua cruda, lo que contribuye a mitigar el ensuciamiento de la membrana para el proceso de desalinización. Este proceso entonces corresponde a todas aquellas operaciones que buscan acondicionar el agua extraída, ya que la eficiencia en el proceso de desalinización por osmosis inversa está directamente relacionada con el estado de las membranas (ONG FIMA 2023).

En general existen dos tipos de pretratamiento del agua bruta antes de ser sometida al proceso de osmosis inversa. El primero es el tratamiento por filtración y el segundo es el tratamiento químico. Si bien los operadores de plantas desalinizadoras recomiendan realizar un pretratamiento combinado fisicoquímico, el tipo de proceso a utilizar dependerá de las condiciones y calidad del agua captada.

Uno de los sistemas básicos es el que se relaciona con el tratamiento físico, el cual, a través de procesos de filtración o remoción de sólidos presentes en el agua, comúnmente para ello se utilizan filtros de diferentes medidas (multimedia) que remueven las impurezas presentes.

En tanto, el pretratamiento de tipo químico cuya función es la eliminación o disminución de minerales presentes en el agua, como también de sustancias químicas y orgánicas, comúnmente utiliza métodos como la aplicación de biocidas, como el cloro o el bisulfito, y también de ablandadores o suavizadores de agua. De la misma forma en este tipo de pretratamiento se considera el monitoreo de los niveles de pH, dureza y alcalinidad para evitar la precipitación de carbonatos, utilizando inhibidores de incrustaciones para evitar su formación.

Como se comenta previamente, el uso de los procesos en el pretratamiento del agua captada dependerá directamente de las condiciones y calidad de esta, condicionado su uso a los monitoreos tanto de la fuente de agua bruta, como de la acumulación de esta posterior a la captación. A continuación, en la **Tabla 2** se presenta una recopilación de operaciones de pretratamiento más utilizadas antes de la etapa de desalinización por osmosis inversa.

Tabla 2. Operaciones de pretratamiento más utilizadas

Tipo de tratamiento	Operación	Descripción
Físico	Filtración	Eliminación de partículas y sólidos suspendidos a través del uso de filtros convencionales.
	Floculación – Coagulación	Adición de reactivos químicos que aglutinan o agrupan coloides de menor tamaño que se encuentran suspendidos.
	Sedimentación	Permite la decantación de los flóculos formados en la etapa anterior, facilitando su separación.

	Flotación	Busca la separación de elementos que no pueden eliminarse por decantación (algas, aceites, grasas, entre otros) a través de burbujeos.
	Separación por membranas	Se utilizan membranas de micro o ultrafiltración como barreras físicas al paso de partículas de menor tamaño.
Químico	Intercambio iónico	Membranas selectivas que permiten extraer iones del agua cruda, disminuyendo la concentración de boro, arsénico y minerales.
	Precipitación	Disminución de la solubilidad de sales en el agua, provocando su precipitación. La precipitación de los compuestos se logra a través del aumento de la temperatura del agua.
	Acidificación	Corresponde a la adición de ácidos minerales (como el ácido sulfúrico) para evitar la formación de incrustaciones calcáreas.
	Aplicación de anti-incrustantes	Evita la precipitación de sales cuando el agua está siendo filtrada en las membranas.
	Desinfección	Disminuye la proliferación de microorganismos a través del tratamiento con ozono, radiación ultravioleta o la adición de diversos biocidas, siendo el más común el hipoclorito de sodio (cloro).
	Declaración	Corresponde a la adición de químicos que buscan evitar el deterioro de las membranas debido a la exposición a altas concentraciones de cloro.

Fuente: (ONG FIMA 2023).

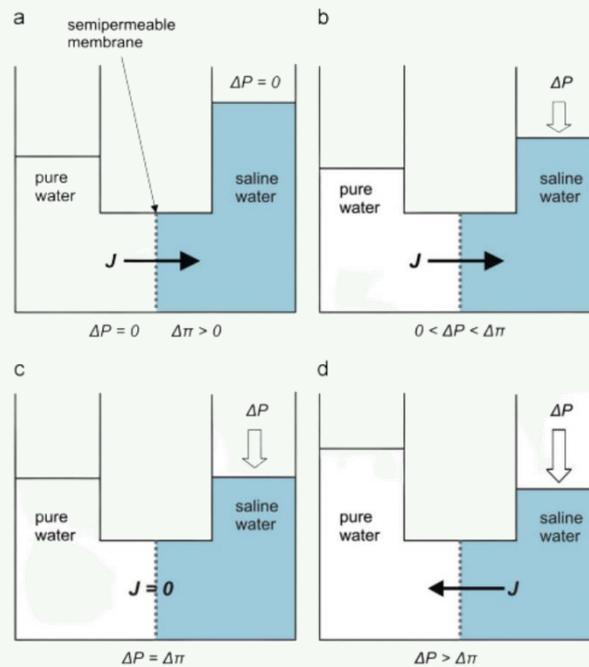
Osmosis inversa

Para comprender de mejor manera el principio de operación de osmosis inversa es necesario definir el proceso de osmosis, el cual es producido cuando dos soluciones de diferentes concentraciones como, por ejemplo, diferentes salinidades, están separadas por una membrana que permite selectivamente el paso de algunas sustancias, pero no de otras (Helfer, Lemckert and Anissimov 2013). Si estas dos soluciones son agua dulce y agua de mar, por ejemplo, y se mantienen separadas por una membrana en la que sólo es permeable al agua, el agua del lado de la solución menos concentrada (agua dulce) fluirá hacia el lado de la solución más concentrada (agua de mar). Este flujo continuará hasta que las concentraciones a ambos lados de la membrana sean iguales o la presión en el lado de la solución concentrada sea lo suficientemente alta como para detener el flujo. Es así como en condiciones de ausencia de flujo, esta presión será igual a la presión osmótica de la solución.

La presión osmótica de una solución, por tanto, no es una presión que ejerce la propia solución, sino una presión que debe aplicarse a la solución desde el exterior para evitar el flujo osmótico. Es

así como la presión osmótica se define como la presión exacta capaz de detener el flujo de disolvente como muestra la **Figura 9**.

Figura 9. Presión osmótica en el proceso de desalinización



Fuente: (Helfer, Lemckert and Anissimov 2013).

Si el gradiente de presión que se ejerce externamente es superior a la presión osmótica, el flujo de disolvente se invierte, provocando la extracción del disolvente de la solución concentrada, convirtiendo en el ejemplo anterior agua salada en agua dulce, denominada de manera más exacta como agua desmineralizada. Lo anterior corresponde a la osmosis inversa ya que el agua se mueve en sentido opuesto a la de un proceso osmótico natural.

Las plantas desalinizadoras que operan con el principio de osmosis inversa presurizan el agua salina hasta una magnitud superior a su presión osmótica forzándola a fluir a través de la membrana semipermeable. La membrana detiene el flujo de sales y solo el agua dulce permea a través de la membrana generando dos flujos: por un lado, el flujo permeado que corresponde al agua libre de sales y por el otro el flujo de salmuera o agua de rechazo que corresponde al agua que contiene las sales concentradas debido a la retención de la membrana.

Se estima que para llevar a cabo el proceso de osmosis inversa el consumo de energía promedio es de 4 kWh/m³, aunque es común que las instalaciones de osmosis inversa presenten recuperadores de energía que capturan y reutilizan la energía de las bombas motorizadas de alta presión. Este proceso “recicla” la energía de la salida de la salmuera, reduciendo la potencia necesaria de la bomba de alta presión (ALADYR 2019).

A continuación, se presenta un esquema de un diseño típico de osmosis inversa incluyendo la recuperación de energía.

Figura 10. Esquema de un diseño típico de osmosis inversa



Fuente: Elaboración propia en base a (ALADYR 2019).

Post tratamiento

Como se estableció en el Capítulo 2, para la producción de hidrógeno verde los requerimientos de calidad de agua son específicos y se encuentran definidos por la Norma ASTM D1193, lo que obliga en el proceso de obtención de recurso hídrico a través de la desalinización de agua de mar a realizar procesos como los anteriormente expuestos para un post tratamiento a la salida del proceso de osmosis inversa.

Al término de esta etapa el recurso hídrico tiene la calidad y capacidad de ser considerado un insumo para la producción de hidrógeno verde y de sus derivados, sin poner en riesgo los equipos e instalaciones dispuestos en esta industria.

Descarga de aguas de rechazo

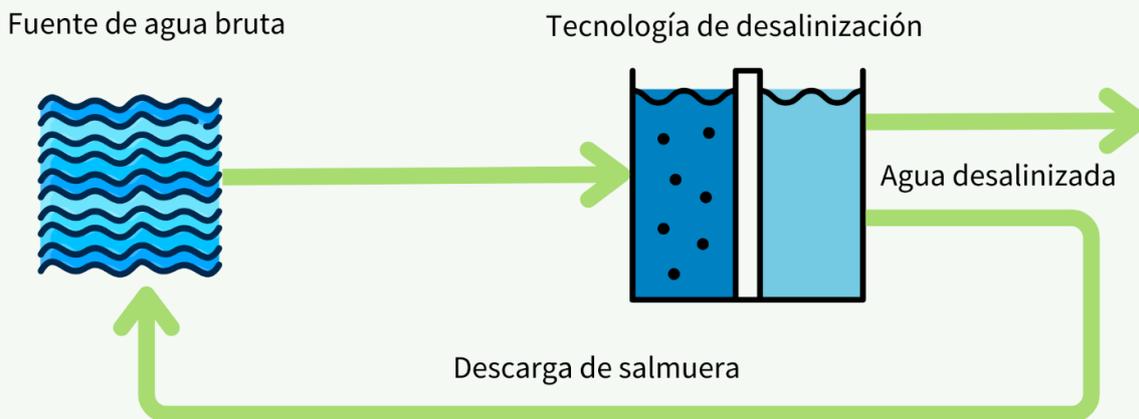
Es tal vez esta parte del proceso de desalinización de agua de mar la que ha generado más controversia en el desarrollo de este tipo de tecnologías, y es que las denominadas aguas de rechazo son los residuos líquidos resultantes de la desalinización, los que en ciertas ocasiones contiene no solo una concentración de sales mayor a la concentración de la fuente de origen del agua bruta, sino también los vertidos derivados del pretratamiento que se mencionaron anteriormente, y de la labores que incluyen el uso de biocidas, coagulantes, floculantes, etc. (ONG FIMA 2023). En cuanto a la concentración de sales que presenta este efluente, puede presentar una salinidad superior entre 1,09 y 1,82 en comparación con la fuente de agua bruta (ALADYR 2019). Esto dependerá directamente del coeficiente de recuperación con que opere la planta de desalinización.

La disposición de estas aguas de rechazo, comúnmente se realiza directamente en el mar, lo que genera diferentes impactos, dependiendo de cómo estas se dispersen y distribuyan en el medioambiente. Con el objetivo de disminuir estas afectaciones ambientales, las normativas EPA proveniente de USA para la toma o succión, la australiana o la europea, abordan estrictamente la devolución de salmuera al mar. En Chile, es común que se adopte la norma australiana la que limita a un máximo de 5% el aumento de la salinidad en el punto en que no hay velocidad en la descarga. Propone además utilizar una velocidad de descarga de 5 m/s a través de difusores posicionados a una determinada distancia de cada uno con el objetivo de diluir con mayor facilidad la concentración en el punto de descarga.

Captación de agua de mar para Power-to-X

Si bien las tecnologías de desalinización pueden clasificarse en base a distintos factores y se compone de varios procesos que forman parte de la cadena de valor del tratamiento de agua bruta a agua desalinizada, una simplificación del proceso permite comprender la cantidad de agua que se requiere extraer de la fuente de agua bruta para ser convertida a agua desalinizada o destilada que como vimos en el capítulo anterior, forma la base para la fase de electrólisis (Jones, et al. 2018).

Figura 11. Esquema simplificado de proceso de desalinización



Fuente: Elaboración propia en base a (Jones, et al. 2018).

Para producir agua desalinizada, el agua bruta debe ingresar a la planta de desalinización y realizar el proceso de separar las sales o solutos del agua para producir agua libre de cualquier concentración o destilada. Las sales separadas se mezclan en una solución de sales concentradas denominada "salmuera" la que es comúnmente devuelta a la fuente de agua bruta, lo que como se comenta luego en este capítulo, puede provocar algunos impactos ambientales. La proporción de

agua desalinizada y salmuera que se produce dependerá de diversos factores, tanto tecnológicos como ambientales.

En primer lugar, la proporción de agua de entrada que se convierte en agua de alta calidad depende del coeficiente de recuperación de agua (RR por sus siglas en inglés), siendo el agua restante que se convierte en salmuera como una corriente residual calculada como $(1-RR)$. Este coeficiente está relacionado con las diferentes tecnologías que son empleadas para la desalinización, asociando a las tecnologías de membrana con coeficientes de recuperación más altos (Jones, et al. 2018).

Además, es importante considerar que no todas las fuentes de agua bruta contienen la misma cantidad de solutos. En ese sentido, si se habla de desalinización en Chile, se considera que la media de salinidad del océano pacífico es de 35 gramos por cada litro de agua. Lo anterior, afecta también al coeficiente de recuperación, como se evidencia en la **Tabla 3** donde se comparan distintos coeficientes de recuperación de agua para la tecnología de osmosis inversa, considerando distintas fuentes de agua bruta.

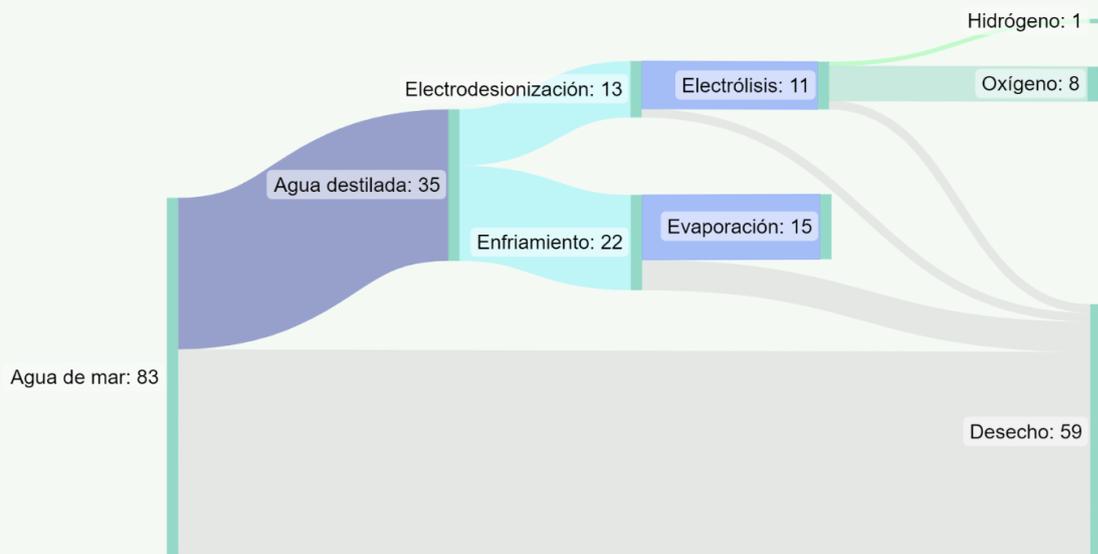
Tabla 3. Coeficiente de recuperación para Osmosis inversa

Fuente de agua bruta	Coeficiente de recuperación (RR)
Agua de mar (SW)	0,42
Agua salobre (BW)	0,65
Aguas superficiales de río (RW)	0,81
Agua pura (PW)	0,86
Salmuera (BW)	0,19
Aguas residuales (WW)	0,65

Fuente: (Jones, et al. 2018)

Asumiendo que los proyectos de desalinización que abastecerían a la industria de la producción de Hidrógeno Verde y sus derivados utilizaran como fuente de agua bruta al agua de mar, entonces por cada 1 kg de agua de mar captada se producirán 0,42 kg de agua desalinizada o destilada y 0,58 kg de salmuera. De esta forma es posible extrapolar la cifra, definiendo que para producir los 35 kg de agua destilada necesarios para producir 1 kg de H₂ es necesario extraer 83 kg de agua de mar, lo que producirá un flujo residual de 48 kg de salmuera como se muestra en el diagrama de Sankey mostrando en la **Figura 12**.

Figura 12. Cantidad de agua de mar necesaria para producir Hidrógeno [kg]



Fuente: Elaboración propia.

Reutilización de aguas tratadas

Además del agua de mar como fuente de agua bruta, la reutilización de las aguas de desechos residuales se ha posicionado como una nueva fuente de recursos hídricos, después de ser sometidas a un tratamiento pertinente, adecuado y concordante a los fines a las que serán destinadas. Es entonces que la reutilización de aguas tratadas consiste en la recirculación de aguas descartadas provenientes de distintos procesos, usos o sectores, ya sea de origen domiciliario, industrial o comercial, considerando esta como una fuente de agua bruta para abastecer por ejemplo a la industria de la producción del Hidrógeno Verde y sus derivados.

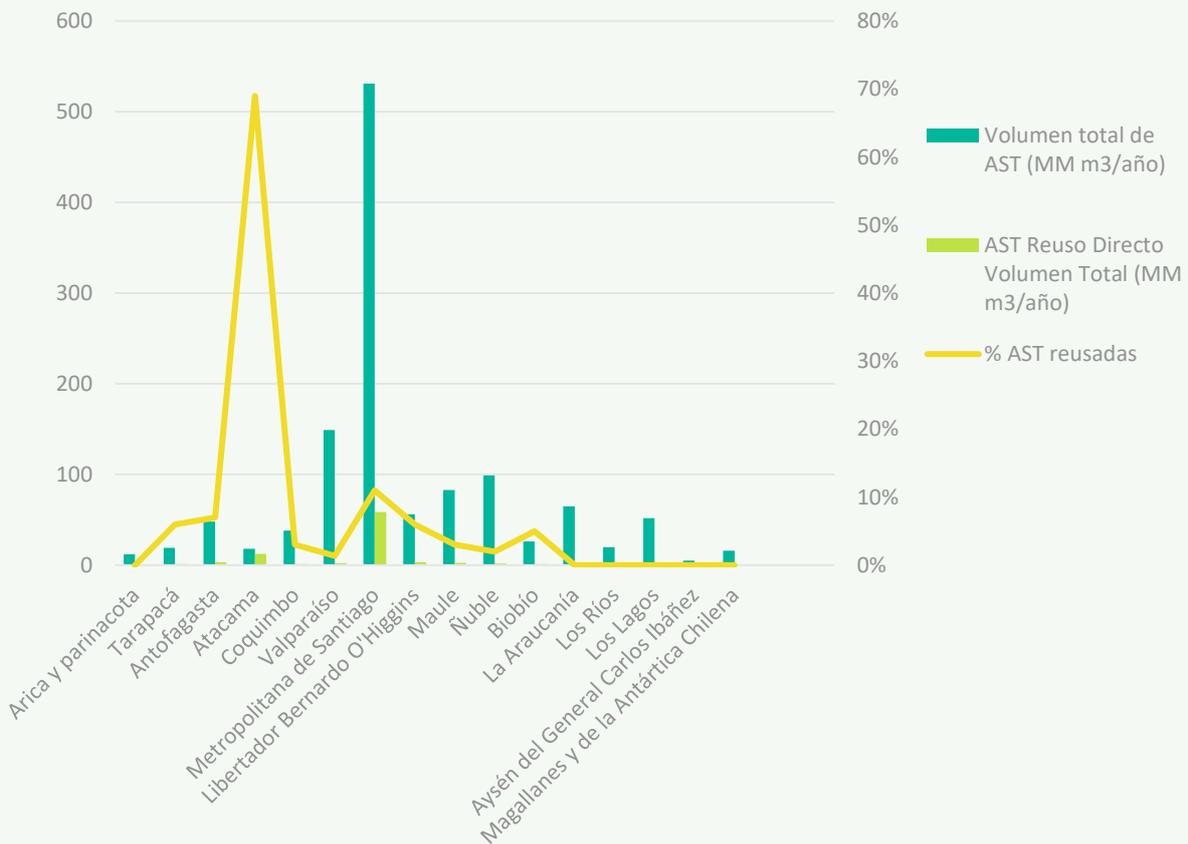
En Chile la cobertura de tratamiento de aguas residuales es prácticamente universal (Donoso y Rivera 2020), contando con una cobertura de tratamiento de agua servidas urbanas del 99,98%. Lo anterior, se debe a las 302 Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) en operación en el país, lo que permitió al año 2022 tratar 1.225 millones de metros cúbicos, de los cuales en la actualidad no se reutiliza más del 6%, esto significa una reutilización de 73 millones de metros cúbicos al año de aguas servidas tratadas (SISS 2022).

Lo anterior, presenta una oportunidad para aprovechar el 94,2% de aguas residuales restantes para el tratamiento y posterior uso en la industria de la producción del Hidrógeno Verde y sus derivados, permitiendo aportar 1.152 millones de metros cúbicos al año de agua bruta, lo que es comparable a más de 4 veces el volumen útil total del embalse El Yeso.

El reúso de aguas servidas tratadas se clasifica, desde su reúso directo reconociendo en el mismo informe de SISS 2022 que el sector agrícola reusó el 62%, seguido por un 20% para uso interno de las PTAS, un 18% en el sector minero y solo un 0.1% para el sector industrial. Con lo anterior, es

posible reconocer el volumen de aguas tratadas por región y su porcentaje de reúso directo como aparece en la **Figura 13**.

Figura 13. Volumen de aguas tratadas por región



Fuente: (SISS 2022).

Si bien el caudal es mayormente tratado en la región Metropolitana, durante el año 2019 la planta que trata el 100% de las aguas servidas que se generan en la región de Antofagasta, ingresó un total de 28.932.205 m³, de los cuales no más del 11,3% fueron reutilizados por la industria (ECONSSA Chile 2019). En tanto en la región de Magallanes y de la Antártica Chilena, como declara la empresa Aguas Magallanes, durante el mismo año, se trataron 11.221.000 m³ (Aguas Magallanes S.A. 2019).

A diciembre del año 2022, operaban 302 plantas de tratamiento de aguas servidas en el sector concesionado sanitario urbano en el país. De estas, el 63% del total de plantas de tratamiento de

aguas servidas opera con la tecnología de lodos activos, presentando 189 sistemas de este tipo (SISS 2022).

Los sistemas de tratamiento de aguas servidas descargan a cuerpos de aguas superficiales, por lo que la normativa actual de “Regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales” establece límites máximos de concentración para ciertos parámetros dependiendo a que cuerpo de agua superficial se descarga.

Al año 2021, se contabilizaron 33 plantas de tratamiento de aguas servidas utilizando el sistema en base a emisarios submarinos, cifra que se mantuvo durante 2022 (SISS 2022). Este es un sistema de deposición final de las aguas residuales en el mar, permitiendo facilitar el tratamiento natural del medio marino, aprovechando la capacidad para asimilar y transformar las sustancias del efluente doméstico (DIRECTEMAR 2007). Según esta definición un emisario submarino corresponde a una canalización bajo el mar, pero en Chile, este corresponde a cualquier ducto que descarga sus residuos a cuerpos de agua como canales, ríos, lagos, lagunas y el mar. Normalmente, las aguas que descargan a través de estos sistemas solo incluyen un tratamiento preliminar, como desbaste de sólidos, desengrasado y desarenado, por lo cual, el uso de los sistemas de emisarios submarinos no debiese ser considerado dentro de las primeras opciones de tratamiento de aguas residuales, al tener presente una amenaza ambiental constante.

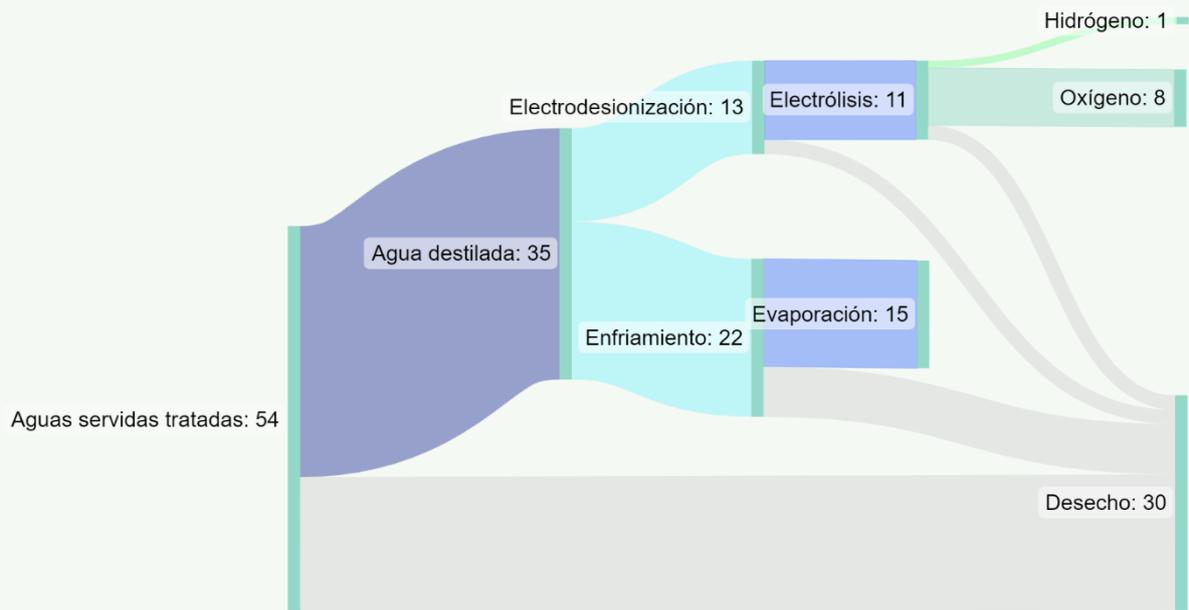
En el mar existen especies sensibles que al verse impactadas por estos grandes ductos cortan las tramas tróficas. Además, si se depositan sedimentos en los alrededores de los emisarios, las comunidades bentónicas acumulan contaminantes que dependiendo del tipo de agua que se descargue pudiera contener metales pesados o dioxinas que son traspasadas a sus depredadores. En Chile, los contaminantes que se descargan al mar por los emisarios submarinos pueden corresponder a materia orgánica, metales pesados, compuestos orgánicos persistentes e hidrocarburos (DIRECTEMAR 2007). Lo anterior plantea un enorme desafío si se considera que el crecimiento demográfico de la población urbana y rural en el mundo genera que día a día aumente el consumo de agua y por consiguiente el desecho de aguas residuales.

Reúso de aguas servidas tratadas para Power-to-X

Si se consideran las aguas desechadas tratadas a través de emisarios submarinos como una oportunidad para obtener agua bruta que abastezca a la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados, será necesario realizar un proceso de tratamiento para poder integrar este recurso hídrico en la cadena de valor, cumplimiento con los parámetros señalados en el capítulo 2.

Diversas tecnologías de tratamiento de aguas son utilizadas en Chile (SISS 2022), pero si se considera la tecnología de Osmosis Inversa, es posible comprender de la Tabla 3 que el Coeficiente de Recuperación (RR) será de 0,65 lo que indica que, por cada 1 kg de agua servida tratada, se obtendrá 0,65 kg de agua destilada que podrá ser insertada para la industria del Hidrógeno Verde y derivados. De esta forma, es posible desarrollar el diagrama de Sankey presentado en la **Figura 14**.

Figura 14. Cantidad de aguas servidas tratadas para producir hidrógeno [kg]



Fuente: Elaboración propia.

Es necesario señalar que el caudal de aguas de rechazo, resultante del proceso de desalinización con aguas servidas tratadas dependerá directamente del efluente en cuanto a cantidad y calidad, esto ofrece un desafío respecto a la normativa relativa a la calidad de las aguas residuales, lo que puede incidir fuertemente en su potencial reúso para la industria del Hidrógeno Verde y de sus derivados.

Conclusión del capítulo

Para abastecer a la industria del Hidrógeno Verde y de sus derivados, que plantea una producción anual de 3 megatoneladas de hidrógeno al 2030, serán consumidos 107 millones de metros cúbicos de agua desalinizada o destilada en el mismo periodo.

Pero, como se evidenció antes, para comprender realmente la huella hídrica de la industria del Hidrógeno Verde y de sus derivados es necesario comprender cuanto consumiría considerando la fuente de agua bruta, ya sea agua de mar o aguas servidas tratada, y es que si se considera como una posibilidad que la industria se abastezca enteramente de agua de mar, entonces se requeriría extraer anualmente más de 255 millones de metros cúbicos del mar para ser tratados. En tanto si se considera el escenario en que el consumo hídrico sea satisfecho enteramente por aguas servidas tratadas, la industria requeriría cerca de 166 millones de metros cúbicos anualmente. Este análisis toma relevancia principalmente en Chile, donde como se mencionó anteriormente, la brecha hídrica se sitúa en 82,6 metros cúbicos por segundo, según cifras de la Dirección General de Aguas de 2015.

En tanto, el consumo regional, tanto en Antofagasta y Magallanes dependerá de la producción regional de Hidrógeno Verde y de sus derivados, reconociendo que a 20230 la región de Antofagasta produciría más de 1,226 millones de toneladas de hidrógeno verde anualmente. En tanto la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena produciría más de 1, 794 millones de toneladas de hidrógeno verde al año. Lo anterior plantea un consumo de agua supuesto de casi 43 millones de metros cúbicos anuales para la Región de Antofagasta y de 62 millones de metros cúbicos anuales para la región de Magallanes y de la Antártica Chilena, lo que significa un consumo 2,4 veces mayor si se plantea el agua de mar como única fuente de agua bruta y 1,5 veces mayor si se posiciona como fuente de agua bruta a las AST.

Como se revisó anteriormente, las regiones producen distintos caudales de aguas servidas y disponen de ellas de manera diferenciada. Según datos de la SISS 2021, el caudal medio mensual de los emisarios submarinos en la región de Antofagasta fue de 3 metros cúbicos por segundo, lo que representa más de 94 millones de metros cúbicos anuales que usualmente son descargadas en el mar. Resulta una oportunidad aprovechar este efluente que representa el 143% del consumo regional estimado para la producción de hidrógeno verde y sus derivados. Distinta es la situación en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena donde el caudal medio mensual de los emisarios submarinos permite suponer que no se pudiera cubrir más del 9% del potencial consumo hídrico de la industria, obligando a los productores a analizar otras fuentes como la de agua de mar como una oportunidad para desarrollar proyectos que no utilicen aguas superficiales continentales para la producción de Hidrógeno Verde y de sus derivados.

A simple vista, las aguas servidas tratadas se presentan como una oportunidad para avanzar en una industria sostenible que sea eficiente no solo energéticamente, sino también considere la eficiencia hídrica en sus procesos. Solo como un dato adicional, Fundación Chile en el año 2016, señaló que el reúso de aguas residuales tratadas posee un costo de inversión 72% más bajo, así como una operación 84% menor, en comparación a la desalinización de agua de mar, si no se consideran los costos de conducción asociados, los que dependen de la distancia a recorrer (Fundación Chile 2016).

4

Desafíos



Desafíos

Es entonces que se plantea la duda de por qué actualmente existen muy pocos, o no existen proyectos relacionados a la cadena de valor del Hidrógeno Verde y de sus derivados que planteen el reúso de aguas servidas tratadas como fuente de agua bruta. Al respecto, es posible identificar 4 factores claves que plantean desafíos a superar para potenciar el reúso de las aguas residuales tratadas en Chile, los que contemplan desde un análisis jurídico, la falta de una legislación particular y propia sobre el reúso de aguas residuales, sumado a la insuficiencia normativa que traba la planificación, ordenación y promoción sostenible del reúso de aguas residuales tratadas.

Otro factor clave es el ambiental, ya que la reutilización del agua no tratada presenta riesgos ambientales, como la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas y la degradación de ecosistemas acuáticos. De la misma forma, la descarga de aguas no tratadas aporta un alto nivel de nutrientes, lo que según evidencia de la zona centro y sur de Chile, se relaciona con el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, como también a la mortandad de peces.

Es entonces importante un tratamiento de aguas residuales antes de la reutilización lo que permite mitigar los riesgos para el medio ambiente. Pese a esto, las normas de calidad para las descargas de aguas residuales tratadas son insuficientes, esto aumenta la incertidumbre y coarta la inversión en este rubro (Donoso y Rivera 2020).

En términos financieros, se plantea el desafío de financiar la infraestructura de saneamiento y recuperar sus costos. En la práctica se ha comprobado que, al exigir altos niveles de tratamiento, como se plantea la industria del Hidrógeno Verde y de sus derivados resultan factibles desde el punto de vista financiero.

Desde un análisis económico, surge la necesidad de realizar evaluaciones que garanticen beneficios económicos que son difíciles de evaluar, como son: la reducción de la contaminación de recursos hídricos superficiales, subterráneos o marítimos: la protección de los ecosistemas acuáticos; la liberación de recursos frescos o limpios para ser utilizados en la producción de agua potable; el incremento de la sustentabilidad de las actividades en que se materialice el reúso, al depender menos de la variabilidad inherente a la hidrología, en el corto y largo plazo. Al considerar estos beneficios indirectos (sociales, ambientales u otros), no solo desde una evaluación 100% privada, donde solo se recogen los costos y beneficios directos, los proyectos de reúso pueden alcanzar la rentabilidad. Lo anterior sin lugar a duda, plantea la participación del Estado en el reúso de aguas residuales tratadas.

Finalmente, el factor social, se posiciona como una arista limitante para una mayor reutilización de las aguas residuales tratadas, considerando la aceptación del consumir y sus percepciones de reúso, a pesar de la evidencia empírica que muestran que tal reúso es seguro. En definitiva, se presenta una brecha entre la percepción pública y la calidad efectiva de tal recurso que debe cerrarse, lo que posiciona la sensibilización y educación de la población como herramientas clave para fomentar el reúso sostenible de aguas residuales tratadas.

Conclusión

El Hidrógeno Verde y sus derivados se posicionan como catalizadores claves en el futuro sistema energético mundial, constituyendo un pilar hacia la transformación energética con el objetivo de promover la desfosilización a través de tecnologías Power-to-X. Al respecto el Gobierno de Chile a impulsado una estrategia que reconoce al Hidrógeno Verde como una oportunidad para Chile, principalmente por su potencial energético renovable en las regiones de Antofagasta y de Magallanes y de la Antártica Chilena.

Junto con la energía renovable, el otro insumo indispensable para la producción de Hidrógeno Verde y de sus derivados es el agua. Al respecto, la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde plantea 6 pilares entre el que se encuentra el uso equilibrado de recursos y territorio, cuidando el uso responsable del agua y fomentando conceptos de economía circular.

Existe la necesidad entonces de buscar soluciones que permitan adaptarse a los nuevos escenarios, donde los recursos hídricos irán en disminución y el consumo de agua aumentará en el tiempo, esto, plantea una obligación en Chile para habilitar el bienestar de las futuras generaciones, lo que además representa una gran oportunidad de innovación y creación de valor para el país.

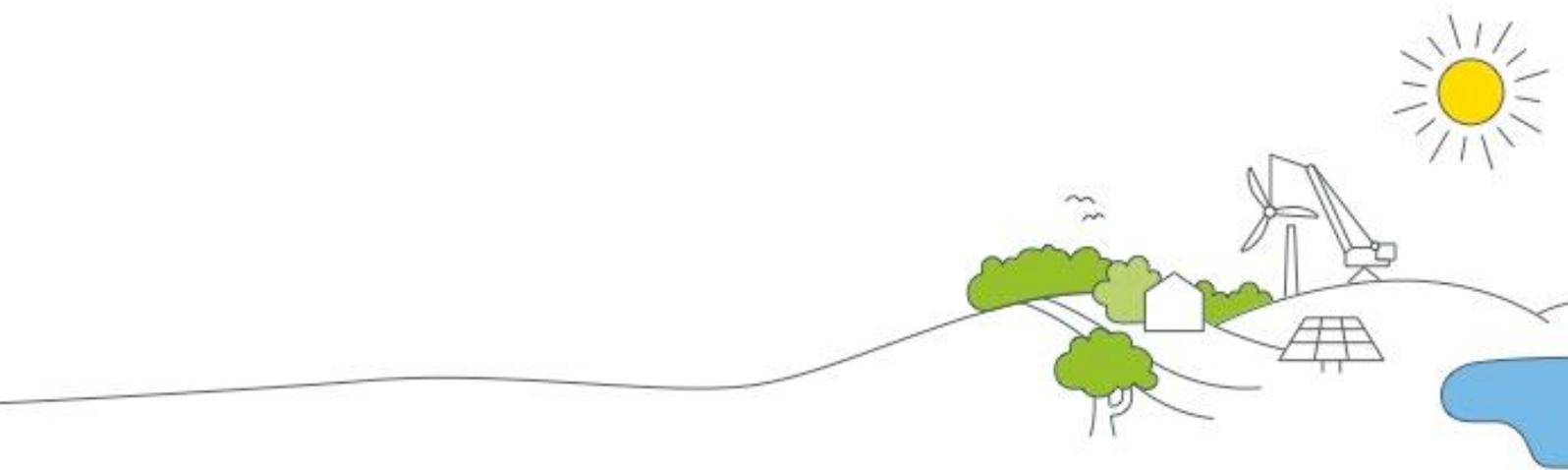
Tanto la desalinización de agua de mar, como la reutilización de aguas servidas tratadas, son procesos con tecnologías maduras que se posicionan como oportunidades para la obtención del recurso hídrico que requiere la naciente industria del Hidrógeno Verde y de sus derivados, las que oportunamente se vislumbran como soluciones complementarias, que suponen una serie de desafíos diferenciados en temas económicos, financieros, ambientales y sociales. Es debido a lo anterior, que este informe busca resaltar la necesidad de abordar el planteamiento de proyectos que se identifiquen en la cadena de valor de tecnologías Power-to-X, y que consideren el uso eficiente de todos los recursos involucrados, resaltando para los efectos del presente informe, el agua, promoviendo estándares de sostenibilidad abarcando cuatro dimensiones básicas: Ambiental, Económica, Social y de Gobernanza.

En conclusión, el presente informe aporta en la creación de criterios que enfoquen el desarrollo de futuros proyectos de producción de Hidrógeno Verde y sus derivados a una disminución de impactos y generación de beneficios en la extracción y consumo del recurso hídrico. Estos criterios, en base a la información expuesta debiesen considerar en su dimensión ambiental, el cuidado y protección de la flora y fauna que interactúa con el recurso hídrico, principalmente agua de mar, reconociendo los impactos inherentes en cada etapa del proceso de desalinización y disponiendo adecuadamente de todos los residuos.

Además, el consumo desde la fuente de agua bruta no debiese contribuir al estrés hídrico de la región respectiva, fomentando el uso de fuentes de recurso hídrico no convencional, priorizando la reutilización de otros efluentes en caso de ser viable.

En cuanto a la dimensión económica, se deben considerar criterios que recojan los costos directos e indirectos, como también los beneficios referidos a externalidades positivas derivados de beneficios sociales, ambientales u otros que permitan alcanzar la rentabilidad de estos proyectos.

Finalmente, la dimensión social considera principalmente el desafío de introducir una nueva industria que requiere de un recurso hídrico permanente y que no soslaye el acceso al agua de las comunidades locales, aprovechando al mismo tiempo las sinergias siempre que sea posible, por ejemplo, en la instalación de desalinizadoras multipropósito o el reúso de aguas para la agricultura o el paisajismo.



Bibliografía

- ACADES; Consejo Minero; Comité Científico de Cambio Climático. *Primer catastro de proyectos y plantas desalinizadoras de agua de mar*. marzo de 2023.
<https://www.acades.cl/proyectos/>.
- Aguas Magallanes S.A. «Memorias 2019.» 2019.
- ALADYR. "Desalación de agua de mar: Situación en Chile y en el mundo." Diapositiva de PowerPoint, Valparaíso, 2019.
- CICE. *The essential chemical industry*. 2016. <https://www.essentialchemicalindustry.org/?start=1> (último acceso: julio de 2023).
- COCHILCO. «Proyección de demanda de agua en la minería Periodo 2022-2033.» 2022.
- Curto, Domenico, Vincenzo Franzitta, y Andrea Guercio. «A review of the Water Desalination Technologies.» *MDPI*, 2021.
- DGA. «Atlas del Agua.» 2016.
- DIRECTEMAR. «Emisarios submarinos en Chile.» 2007.
- Donoso, Guillermo, y Daniela Rivera. «Desafíos del reúso de aguas residuales tratadas en Chile.» *Derecho y Gestión de Aguas, Pontificia Universidad Católica de Chile*, 2020: 71-88.
- ECONSSA Chile. *Antofagasta Disposición*. 2019.
<https://www.econssachile.cl/nosotros/antofagasta-disposicion> (último acceso: junio de 2023).
- EUROWATER. «Water treatment for green hydrogen: What you need to know.» 2022.
- Fundación Chile. «Diagnóstico del potencial de reúso de aguas residuales en la Región de Valparaíso.» Santiago-Valparaíso, 2016.
- Fundación Chile. «Escenarios Hídricos 2030. Radiografía del agua: Brecha y riesgo hídrico en Chile.» Santiago, 2018.
- Gao, Ruxing, et al. "Green liquid fuel and synthetic natural gas production via CO₂." *Elsevier*, 2021: 1-11.
- Ghavam, Seyedehhoma, Maria Vahdati, I. A. Grant Wilson, and Peter Styring. "Sustainable Ammonia Production Processes." *Frontiers in Energy Research*, 2021.
- Gobierno de Chile. "Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile. Actualización 2020." 2020.

- Helfer, Fernanda, Charles Lemckert, and Yuri G. Anissimov. "Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends - A review." *Elsevier*, 2013: 337-358.
- IBM. *Requisitos y especificación del sistema de refrigeración de agua*. 28 de 02 de 2021. <https://www.ibm.com/docs/es/power8?topic=cooling-water-system-specification-requirements>.
- IPCC. «Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the.» Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022, 3056.
- IRENA. «Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor.» Abu Dhabi, 2022.
- IRENA. «Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal.» Abu Dhabi, 2020, 12.
- IRENA. «Renewable Power Generation Costs in 2020.» Abu Dhabi, 2021.
- Jin, Yi, Paul Behrens, Arnold Tukker, and Laura Scherer. "Water use of electricity technologies: A global meta-analysis." *Elsevier*, 2019: 1-11.
- Jones, Edward, Manzoor Qadir, Michelle T H van Vliet, Vladimir Smakhtin, and Seong-Mu Kang. "The state of desalination and brine production: A global outlook." *Elsevier*, 2018.
- Kamkeng, Ariane D.N., y Meihong Wang. «Technical analysis of the modified Fischer-Tropsch synthesis process for .» *Elsevier*, 2023.
- Khan, Meer A.M., S. Rehman, y Fahad A. Al-Sulaiman. «A hybrid renewable energy system as a potential energy source for water.» *El Sevier*, 2018.
- Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. "Estrategia nacional de Hidrógeno verde." Santiago, 2020.
- Naciones Unidas. *Noticias ONU*. 12 de mayo de 2022. <https://news.un.org/es/story/2022/05/1508622>.
- ONG FIMA. «Transición socioecológica justa .» Santiago, 2023.
- Padro, C.E.G. «Hydrogen from other renewable resources.» Presentation at National Academy of Sciences Committee Meeting, 2002.
- Palma-Behnke, R., et al. "The Chilean Potential for Exporting Renewable Energy." Santiago, 2021.
- Peña, Karen. *Diario Financiero*. 25 de octubre de 2021. <https://www.df.cl/empresas/energia/consumo-de-agua-de-mar-en-la-mineria-crece-un-30-y-uso-de-recursos#:~:text=Y%20as%C3%AD%20como%20el%20agua%20de%20mar%20ha,mayor%20uso%20de%20agua%20de%20mar%20o%20desalada>.

PtX Hub International. "Capacitación sobre PtX renovable." Diapositiva PowerPoint, 2022.

Research, O. *Global Water Desalination Market: 2018-2025 key Industry Insights, Segments, Opportunities, and Forecasts*. 2018.

Sachverständigenrat für Umweltfragen. "Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse." 2021.

Santos-Carballal, David, Abdelaziz Cadi-Essadek, y Nora H. de Leeuw. «Catalytic Conversion of CO and H₂ into Hydrocarbons on the CobaltCo(111) Surface: Implications for the Fischer–Tropsch Process.» *The Journal of Physical Chemistry*, 2021: 11891-11903.

Servicio de Evaluación Ambiental. «Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras en el SEIA.» Santiago, Chile, 2023.

SISS. «Informe de Gestión del sector sanitario 2022.» 2022.

SNU. «Escasez hídrica en Chile: Desafíos pendientes.» 2021.

Vicuña, Sebastián, et al. "Desalinización: Oportunidades y desafíos." 2022.