



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**MODELO DE DECLARACIÓN AMBIENTAL DE PRODUCTO PARA  
LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE**

POR

**Nayareth Vanessa Alarcón Cartes**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción  
para optar al título de Ingeniera Civil Química

Profesor Guía  
Dr. Claudio Zaror Zaror

Marzo, 2024  
Concepción (Chile)

© 2024, Nayareth Vanessa Alarcón Cartes

© 2024, Nayareth Vanessa Alarcón Cartes

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## **Agradecimientos**

Me gustaría agradecer a mi familia, en especial a mis padres, quienes han estado siempre presente en toda mi etapa universitaria, dándome consejos y me han apoyado en cada decisión. También a mi abuelo por su preocupación y por cada vez que nos recogió a mis amigas y a mí a la universidad cuando salíamos muy tarde después de certámenes, y a mi hermana que estuvo apoyándome en todo momento.

A todos aquellos que conocí en la Universidad de Concepción; gracias a ellos, esta etapa universitario fue agradable y los recuerdo con cariño.

Igualmente, quiero dar las gracias al profesor Claudio Zaror, por su gran apoyo durante este proceso. Siempre estuvo disponible para resolver cualquier consulta que tuviera y agradezco por compartir sus historias de la vida y profesionales, las cuales recordare siempre, así como brindarme comprensión y facilidades en momentos difíciles.

## Resumen

Para el año 2050, Chile se propone reducir sus emisiones de CO<sub>2</sub> y disminuir su dependencia de energía importada, aprovechando su capacidad para generar energía a partir de fuentes renovables. Esto lo posiciona como un posible líder en la producción y exportación de hidrógeno verde a nivel mundial. En este contexto, la transparencia del desempeño ambiental asociado a la elaboración de los productos constituye un elemento de creciente importancia en la competitividad del mercado internacional. Al respecto, las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) proporcionan información verificable y estandarizada por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) acerca del desempeño ambiental de un producto determinado y forman parte de los atributos de calidad que son importantes para los clientes.

Actualmente, no hay un formato estándar para realizar una Declaración Ambiental de Producto para la producción de hidrógeno verde. Por lo tanto, este estudio presenta una primera aproximación a una propuesta de modelo de DAP para la producción de hidrógeno en Chile, considerando su generación a partir de energía eólica y sus límites del sistema desde la cuna a la puerta. Para realizar este modelo, se requiere determinar las etapas de ciclo de vida que conforman el sistema, así como los inventarios de materiales y energía asociados a cada etapa. Para validar este modelo se realiza un ejemplo de cálculo para la producción de 1 kg de hidrógeno verde, considerado aquí como la unidad funcional de la DAP.

Para abordar estos objetivos, se utiliza información de literatura para identificar los principales componentes del proceso de producción de hidrógeno, que incluyen la generación de energía mediante aerogeneradores, la desalinización de agua de mar por ósmosis inversa, el uso de un electrolizador alcalino y transporte de materiales. Estas etapas se dividen en procesos aguas arriba (*upstream*) y procesos principales (*core*), siendo *upstream* la producción de agua y energía, y *core* la fabricación y operación del electrolizador, además de la producción de energía necesaria por éste. No se incluyen aquí los procesos post-producción (*downstream*) ya que existe una amplia gama de opciones para acondicionamiento, almacenamiento, transporte y uso del hidrógeno verde. La propuesta de DAP consta de tres etapas principales: primero, la presentación de las bases para la realizar la Evaluación de Ciclo de Vida; luego la exposición de los resultados a través de tablas y gráficos; y finalmente, la interpretación de estos resultados, que incluyen un análisis de sensibilidad a los parámetros más críticos del sistema y comparación del indicador de cambio climático con datos de la literatura. Esto permite comprender el impacto ambiental e identificar mejoras. Los resultados muestran que la etapa *core* es la más significativa en términos de carga ambiental, y el acero es el material más contribuyente a los impactos ambientales en ambas etapas, debido a su uso en la fabricación e instalación del aerogenerador y del electrolizador.

El análisis de sensibilidad revela que la variación en la generación de electricidad del aerogenerador tiene un impacto significativo en el perfil ambiental, mientras que el consumo de energía del electrolizador tiene un efecto menor. Se concluye que Chile tiene la capacidad de producir hidrógeno con un menor impacto en la categoría de cambio climático que lo presentado a nivel internacional, evidenciando la ventaja competitiva de nuestro país.

## **Abstract**

By the year 2050, Chile aims to reduce its CO<sub>2</sub> emissions and decrease its reliance on imported energy by leveraging its capacity to generate energy from renewable sources. This positions Chile as a potential global leader in the production and exportation of green hydrogen. In this context, the transparency of environmental performance associated with product development constitutes an increasingly important element in international market competitiveness. Environmental Product Declarations (EPD) provide verifiable and standardized information, endorsed by the International Organization for Standardization (ISO), regarding the environmental performance of specific products, forming part of the quality attributes significant to customers.

Currently, there is no established format for creating an Environmental Product Declaration for green hydrogen production. Therefore, this study presents an initial approach to a proposed EPD model for hydrogen production in Chile, considering its generation from wind energy and its system boundaries from cradle to gate. To develop this model, it is necessary to determine the life cycle stages comprising the system, as well as the material and energy inventories associated with each stage. To validate this model, an example calculation is performed to produce 1 kg of green hydrogen, considered the functional unit of the EPD.

To address these objectives, literature information is used to identify the main components of the hydrogen production process, including energy generation through wind turbines, seawater desalination by reverse osmosis, the use of an alkaline electrolyzer, and material transportation. These stages are divided into upstream and core processes, with upstream involving water and energy production and core involving the manufacture and operation of the electrolyzer, as well as the energy production required by it. Downstream processes are not included here as there is a wide range of options for conditioning, storage, transportation, and use of green hydrogen. The EPD proposal consists of three main stages: first, presenting the bases for conducting Life Cycle Assessment; then, presenting the results through tables and graphs; and finally, interpreting these results, which include a sensitivity analysis of the system's most critical parameters and comparing the climate change indicator with literature data. This allows understanding the environmental impact and identifying improvements. The results show that the core stage is the most significant in terms of environmental burden, and steel is the most contributing material to environmental impacts in both stages, due to its use in the manufacturing and installation of the wind turbine and electrolyzer.

The sensitivity analysis reveals that variations in wind turbine electricity generation have a significant impact on the environmental profile, while the electrolyzer's energy consumption has a lesser effect. It is concluded that Chile has the capacity to produce hydrogen with a lower impact in the climate change category than that presented internationally, demonstrating the competitive advantage of our country.

## Tabla de Contenidos

Índice Tablas.....	8
Índice Figuras .....	10
1. Introducción.....	1
2. Marco Teórico .....	2
2.1 Producción Energías Renovables .....	2
2.1.1 Energía Fotovoltaica.....	2
2.1.2 Energía Eólica.....	3
2.2 Producción de Agua.....	3
2.3 Electrolizador.....	3
2.4 Declaraciones Ambientales de Producto .....	4
3. Objetivos y alcances .....	5
3.1 Objetivo general .....	5
3.2 Objetivos específicos .....	5
3.3 Alcances.....	5
4. Metodología.....	6
4.1 Descripción del proceso de producción de hidrógeno verde .....	7
4.2 Recopilación de información para inventario de flujos de materiales y energía ....	7
4.3 Presentación del modelo de Declaración Ambiental de Producto.....	8
4.4 Validación del modelo de Declaración Ambiental de Producto.....	8
5. Resultados y discusión.....	12
5.1 Etapas del ciclo de vida de la producción de hidrógeno verde.....	12
5.2 Inventarios de materiales y energía asociados a cada etapa del ciclo de vida .....	13
5.2.1 Inventario para panel fotovoltaico policristalino de silicio .....	13
5.2.2 Inventario energía eólica .....	14
5.2.3 Inventario producción de agua por ósmosis inversa.....	14
5.2.4 Inventario electrolizador alcalino .....	15
5.3 Propuesta de Declaración Ambiental de Producto .....	15
5.3.1 Información para la Evaluación de Ciclo de Vida.....	16
5.3.2 Resultados del Desempeño Ambiental .....	17
5.3.3 Interpretación .....	20
5.3.4 Información adicional para incluir en la DAP .....	20
5.4 Ejemplo de cálculo .....	20
5.4.1 Información para la Evaluación de Ciclo de Vida.....	21
5.4.2 Resultado perfil ambiental e interpretación .....	22
5.4.3 Variación del consumo de energía del electrolizador.....	26

5.4.4	Variación en la generación de energía eólica .....	27
5.4.5	Comparación del indicador de cambio climático con datos de la literatura .....	28
6.	Conclusiones .....	30
7.	Referencias .....	32
8.	Anexos .....	35
8.1	Gráficos de la distribución porcentual de tecnologías fotovoltaica en Chile .....	36
8.2	Diagrama general para la producción de un panel de silicio policristalino .....	37
8.3	Sistema de desalinización de agua de mar .....	38
8.4	Esquema de un electrolizador alcalino .....	39
8.5	Estandarización inventario energía eólica para unidad 1 MW .....	39
8.6	Estandarización inventario electrolizador alcalino para unidad 1 kg hidrógeno producido .....	40
8.7	Parametrización del inventario del aerogenerador en base kWh .....	40
8.8	Parametrización del inventario del aerogenerador en base 1 kg hidrógeno producido .....	41
8.9	Parametrización del inventario de la osmosis inversa en base 1 kg de hidrógeno producido .....	42
8.10	Parametrización del transporte de materiales en base 1 kg de hidrógeno producido .....	42
8.11	Matriz energética chilena para el año 2022 .....	43
8.12	Calculo producción global promedio de un aerogenerador .....	43
8.13	Impactos ambientales intermedios para ubicación en Punta Arenas .....	44
8.14	Impactos ambientales intermedios para producción global promedio generación energía eólica .....	44

## Índice Tablas

Tabla 1. Indicadores de impacto intermedio del modelo ReCiPe considerados en este estudio. Fuente: Elaboración propia.....	9
Tabla 2. Datos obtenidos de Explorador Eólico para la producción de energía de un aerogenerador de 2 MW. Fuente: Ministerio de Energía, 2018. ....	9
Tabla 3. Detalles de las bases de datos para los insumos considerados para el sistema en estudio. Fuente: Elaboración propia.....	10
Tabla 4. Resumen de inventario de materiales y energía para la producción de un panel fotovoltaico policristalino de silicio considerando como unidad funcional 1 kW. Fuente: Elaboración propia.....	13
Tabla 5. Resumen de inventario de materiales para fabricación e instalación de un aerogenerador onshore considerando como unidad funcional 1 MW. Fuente : Elaboración propia.....	14
Tabla 6. Resumen de inventario para la producción de 1 m3 de agua desalinizada. Fuente: Elaboración propia.....	14
Tabla 7. Resumen de inventarios para un electrolizador alcalino considerando la producción de un 1 kilogramo de hidrógeno. Fuente : Elaboración propia.....	15
Tabla 8. Estructura general de la Declaración Ambiental de Producto para Hidrógeno Verde. Fuente: Elaboración Propia .....	16
Tabla 9. Tabla de indicadores ambientales para las etapas de upstream, core y downstream. Fuente: ETI SODA (2017) y Nouryon (2023).....	18
Tabla 10. Tabla sobre el tipo de energía, materiales y uso de agua utilizados en las etapas de upstream, core y downstream. Fuente: ETI SODA (2017) y Nouryon (2023).....	19
Tabla 11. Tabla de los flujos de salida de las etapas de upstream, core y downstream considerando su destino final como residuo Fuente: ETI SODA (2017) y Nouryon (2023).....	19
Tabla 12. Tabla de los flujos de salida de la etapas de upstream, core y downstream considerando su uso. Fuente: ETI SODA (2017) y Nouryon (2023).....	20
Tabla 13. Tabla inventario global para la producción de 1 kg de hidrógeno verde. Fuente: Elaboración propia.....	21
Tabla 14. . Impactos ambientales utilizando como ejemplo de cálculo la producción de 1 kg de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia.....	22
Tabla 15. Impactos ambientales para la producción de 1 kg de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia.....	26
Tabla 16. Variación porcentual ante el cambio en el consumo de energía del electrolizador. Fuente: Elaboración propia.....	26

Tabla 17. Datos obtenidos de Explorador Eólico para calcular la producción de energía de un aerogenerador de 2 MW considerando diferentes escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	27
Tabla 18. Variación porcentual ante el cambio de escenario en la generación de energía de un aerogenerador, respecto al caso base (Los Ángeles). Fuente: Elaboración propia.....	28
Tabla 19. Resultado de indicador de cambio climático para diferentes estudios. Fuente: Elaboración propia.....	29
Tabla 20. Matriz energética chilena para el año 2022. Fuente: Generadoras de Chile, 2023.....	43
Tabla 21. Impactos ambientales intermedios para la producción de 1 kg de hidrógeno para caso Puntas Arenas. Fuente: Elaboración propia.....	44
Tabla 22. Impactos ambientales intermedios para la producción de 1 kg de hidrógeno para caso producción global promedio. Fuente: Elaboración propia.....	44

## Índice Figuras

Figura 1. Esquema del proceso productivo para el hidrógeno verde. Fuente: Elaboración propia.....	12
Figura 2. Contribución porcentual de las etapas de core y upstream a los impactos ambientales intermedios. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 3. Contribución de los inventarios de materiales, energía y transporte a la etapa de core. Fuente: Elaboración propia.....	24
Figura 4 . Contribución de los inventarios de materiales, energía y transporte a la etapa de upstream. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 5. Distribución porcentual de las diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos utilizadas para la producción de energía solar en Chile para el año 2018. Fuente: Zurita et al., 2018.....	36
Figura 6. Diagrama para la producción un panel de silicio policristalino. Fuente: Elaboración Propia.....	37
Figura 7. Esquema conceptual de las etapas para el proceso desalinización. Fuente: Vicuña et al., 2022.....	38
Figura 8. Esquema de la piezas que conforman a un electrolizador alcalino. Fuente: Koj et al., 2017. ....	39

## 1. Introducción

En Chile, la producción de energía mediante fuentes solar y eólica ha ido adquiriendo creciente importancia, aprovechando las condiciones propicias como el alto índice de radiación en el norte y los vientos constantes de norte a sur. La meta de ser carbono neutral para el 2050 impulsa la producción de hidrógeno verde mediante la electrólisis del agua con energías renovables. Este versátil vector energético busca lograr una descarbonización multisectorial, anticipando una reducción del 21% en las emisiones totales de CO<sub>2</sub> y disminuyendo la vulnerabilidad ante la dependencia de energía fósil importada. Conjuntamente, la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde establece metas ambiciosas, proyectando a Chile como uno de los principales productores mundiales, con un potencial de producción al 2050 de 160 millones de toneladas anuales, destinadas tanto para uso nacional como exportación, demostrando el gran potencial que tiene este sector (Generadoras de Chile, 2023; Ah2VBiobío, 2021).

La producción de hidrógeno requiere electrolizadores, existiendo tres tipos de tecnologías con diferentes grados de madurez tecnológica. Las tecnologías con mayor nivel de penetración en el mercado son del tipo electrolizador alcalino y el de intercambio de membrana (PEM), donde este último es más costoso debido al uso de materiales nobles. Por otro lado, el electrolizador de óxido-sólido es una tecnología más reciente y tiene un alto costo debido a la necesidad de materiales resistentes a altas temperaturas (Ah2VBiobío, 2021; Germscheidt et al., 2021).

Por otra parte, el suministro de agua es esencial, pero este es un recurso vulnerable al cambio climático. Por lo tanto, se propone generalmente el uso de fuentes alternativas como agua residual o de mar, aunque ambas requieren pretratamiento para eliminar compuestos no deseados. Al respecto, la desalinización mediante tecnología de ósmosis inversa destaca, a pesar de que la electrólisis directa con agua de mar presenta desventajas debido al problema de corrosión y degradación. En Chile, la desalinización de agua de mar se ha ido masificando, con 38 plantas operativas y cerca de un centenar de instalaciones y proyectos de desalinización en 2022 (Vicuña et al., 2022).

Aunque Chile posee un gran potencial para la exportación de hidrógeno verde, es crucial considerar que los mercados internacionales valoran cada vez más la transparencia y el compromiso ambiental de los productos. En este contexto, las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP, o también conocidas como EPD por su sigla en inglés), han tenido una gran masificación en el último tiempo, ya que es un documento que resume, ordena y estandariza de forma verificable la información ambiental asociada a la elaboración de un producto (ISO, 2006a). Esto facilita la comparación entre productos similares, promueve la oferta y demanda de productos con menor impacto ambiental, ayuda a los compradores a tomar decisiones informadas y estimula mejoras en el desempeño ambiental del producto. Las DAP están formalizadas por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) en la norma acerca de eco etiquetados tipo III, ISO 14025:2006 que establece los principios y procedimientos para las declaraciones ambientales (ISO, 2006a).

## **2. Marco Teórico**

En este capítulo se presentan las características de las tecnologías con mayor potencial de ser utilizadas en Chile. Se detallan las fuentes de energía renovable como solar fotovoltaica y eólica, la obtención de agua mediante el uso de agua de mar con tecnología de ósmosis inversa y la producción de hidrógeno verde mediante el uso de electrolizador alcalino. Además, se entregan antecedentes generales de las DAP.

### **2.1 Producción Energías Renovables**

#### **2.1.1 Energía Fotovoltaica**

En Chile, el tipo de panel fotovoltaico más utilizado, tanto en plantas en operación como en desarrollo, es el panel de silicio policristalinos (p-cSi) (Zurita et al., 2018). Esta elección se debe a su menor costo y al menor uso de suelo que requiere, en comparación con otras tecnologías de paneles disponibles. A modo de referencia, en el anexo 8.1 se presenta un gráfico de la distribución porcentual de las diferentes tecnologías implementadas de panel fotovoltaico en Chile.

En términos generales, para la producción del panel p-cSi, es necesario extraer arena de cuarzo y procesarla térmicamente con coque, para luego someterla a un proceso de purificación, donde se obtiene silicio con alto porcentaje de pureza. Luego, éste se convierte en un polvo fino que reacciona con cloruro de hidrógeno anhidrido para formar silicio puro. Así, el silicio se funde y se cristaliza para obtener laminas delgadas llamadas obleas, donde éstas pasan por un tratamiento para eliminar impurezas y lograr una superficie pulida y así obtener una célula solar. Finalmente, varias de estas células solares se ensamblan para lograr el panel fotovoltaico (Rashedi & Khanam, 2020). En el anexo 8.2 se presenta un diagrama general del proceso descrito.

Diversos estudios han concluido que la producción de silicio es una de las etapas con mayor carga ambiental, debido al uso intensivo de electricidad y combustible, tales como coque, petróleo, diésel, entre otros (Hong et al., 2016; Huang et al., 2017; Rashedi & Khanam, 2020). Estas cargas ambientales generan impactos principalmente en las categorías de agotamiento de recursos fósiles y en potencial de toxicidad humana. Estos trabajos también señalan que el proceso de montaje de panel solar presenta una alta carga ambiental adicional, por el uso de materiales como aluminio, vidrio y plástico donde se ve reflejado en mayor porcentaje en indicadores de impacto relacionado con cambio climático y toxicidad humana. Por lo tanto, para disminuir la carga ambiental en estos indicadores, es necesario aumentar la eficiencia energética en la etapa de producción de silicio y preferir materiales reciclados como el aluminio secundario.

### **2.1.2 Energía Eólica**

En Chile, el tipo de aerogenerador más utilizado es el que está instalado en tierra firme (*onshore*). Diversos estudios de análisis ambiental de ciclo de vida para el sistema de generación de energía eólica demuestran que la mayor carga ambiental se encuentra en la etapa de fabricación del aerogenerador (Gao et al., 2021; Nagashima et al., 2017; Wang et al., 2019). En esta etapa, se construyen las piezas que lo componen, siendo el acero el principal material utilizado. La fase de construcción, donde se realizan los cimientos para instalación en terreno, también contribuye significativamente, utilizando principalmente concreto y acero. Estas dos etapas mencionadas, aportan en un gran porcentaje a impactos en categorías de potencial de acidificación, toxicidad humana, eutrofización, calentamiento global y generación de ozono fotoquímico.

Para mitigar estas contribuciones, se han desarrollado iniciativas encaminadas a cambiar la forma de fabricación del acero, dado que constituye aproximadamente un 70% de los materiales utilizados para la fabricación del aerogenerador. Para esto, se han implementado globalmente procesos siderúrgicos con mayor eficiencia energética, mediante uso de hornos eléctricos utilizando energías renovables, uso de acero reciclado entre otras medidas.

## **2.2 Producción de Agua**

La producción de agua mediante la desalinización de agua de mar ha sido objeto de estudio en múltiples investigaciones. En el anexo 8.3 se presenta en detalle un esquema general para el proceso de desalinización. Según diversas publicaciones acerca de los potenciales impactos ambientales de plantas desalinizadoras de agua de mar que operan con tecnologías de ósmosis inversa, se ha concluido que la electricidad es el principal contribuyente a la mayoría de las categorías de impacto, especialmente en plantas donde no se utiliza energías renovables (Aljuwaisseri et al., 2023; Fayyaz et al., 2023). Por lo tanto, según un estudio publicado con datos de la planta Barcelona- Llobregat de la ciudad de Barcelona, de un consumo de energía eléctrica promedio de 3,7 MWh/m<sup>3</sup> de agua, cerca del 71% se atribuye al proceso de ósmosis inversa, debido a que se requieren bombas de alta presión para forzar al agua a pasar a través de una membrana semipermeable, mientras que alrededor de 27% se gasta en alimentación, pretratamiento, bombeo de agua tratada y sistemas auxiliares (Sanz et al., 2013). Por otra parte, la salmuera devuelta al mar se presenta como la principal contribuyente al potencial de impacto por eutrofización marina (Aljuwaisseri et al., 2023; Fayyaz et al., 2023).

## **2.3 Electrolizador**

Un electrolizador alcalino se compone de electrodos fabricados de materiales de bajo costo como níquel, hierro o aluminio, membranas elaboradas a partir de polímeros (ej. Zirfon), solución acuosa con presencia de electrolitos (ej., KOH) y, por último, marcos, juntas y otras piezas estructurales, fabricadas mayormente de acero (Koj et al., 2017; Kolahchian et al., 2023). Para más detalles en el anexo 8.4 se presenta en detalle un esquema de las piezas que componen a un electrolizador alcalino.

Estudios publicados sobre Evaluación de Ciclo de Vida de electrolizadores muestran cierto consenso de que la fase de operación, en especial suministro de electricidad proveniente de la red, es la que más contribuye para todas las categorías de impacto, seguido de la etapa de construcción de la infraestructura productiva (Koj et al., 2017; Kolahchian et al., 2023). Por su parte, la etapa de construcción tiene más importancia en la categoría de agotamiento de la capa de ozono, ya que aquí se utilizan materiales como acero y níquel que tienen efecto significativo en este tipo de impactos.

## **2.4 Declaraciones Ambientales de Producto**

Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) corresponden a ecoetiquetas ambientales, específicamente tipo III, que se caracterizan por tener enfoque de ciclo de vida y estar sometidas a verificación por entidades externas validadas por la ISO (ISO, 2006a). Las DAP buscan presentar un perfil ambiental estandarizado y cuantitativo asociado a la elaboración de un determinado producto. La norma ISO 14025:2006 es una guía que entrega los principios y requisitos para su realización (ISO, 2006a). Las DAP se basan en Evaluaciones de Ciclo de Vida (ECV), una metodología que evalúa los aspectos e impactos ambientales relevantes del producto a lo largo de su ciclo de vida, siguiendo los principios de la serie de normas ISO 14040:2006, homologada como norma chilena NCh 14040:2012 donde se entrega los principios y el marco metodológico para la ECV (ISO, 2006b).

Para realizar la DAP de un producto específico se deben seguir los lineamientos establecidos en las respectivas Reglas por Categoría de Producto (RCP, conocidas como PCR por su sigla en inglés) que contienen un conjunto de reglas, requisitos y lineamientos establecidos para realizar las DAP de una familia de productos (EPD, 2021).

En la literatura, no se tienen estudios sobre el perfil ambiental del hidrógeno con enfoque de DAP, mientras que solo se encuentran Evaluaciones de Ciclo de Vida de procesos de generación de dicho producto en diferentes escenarios tecnológicos específicos. En muchos estudios, los impactos ambientales se focalizan en la categoría de cambio climático, dejando de lado otros potenciales impactos relevantes, como efecto de acidificación, eutroficación, destrucción de capa de ozono, entre otros (Valente et al., 2017). Además, no tener estándares específicos para la producción de hidrógeno verde afecta a la comercialización internacional y la armonización de políticas (Velázquez et al., 2020).

Chile posee un enorme potencial para transformarse en uno de los principales productores y exportadores mundiales de hidrógeno verde. En la actualidad, no existe un formato para realizar DAP asociados a la producción de hidrógeno verde, por lo que existe la necesidad de desarrollar este tipo de declaraciones dado la potencial importancia del hidrógeno verde para la economía nacional. Esta memoria de título presenta una primera aproximación para proponer una DAP que permitiría una evaluación transparente y estructurada del desempeño ambiental del hidrógeno verde chileno, destacando y diferenciando su posición ante el escenario global.

### **3. Objetivos y alcances**

#### **3.1 Objetivo general**

Proponer un modelo de Declaración Ambiental de Producto para la producción de hidrógeno verde en Chile, a partir de energía eólica, considerando como límites del sistema de la cuna a la puerta.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Describir y determinar las etapas del ciclo de vida para la producción de hidrógeno verde.
- Identificar los inventarios de materiales y energía asociados a cada etapa de la producción de hidrógeno verde.
- Presentar y validar un modelo de declaración ambiental de producto para la producción de hidrógeno verde mediante un ejemplo de cálculo.

#### **3.3 Alcances**

El estudio se realizó considerando una unidad funcional de 1 kg de hidrógeno, excluyendo las etapas de post electrólisis (compresión, transporte, uso, etc.), dada la multiplicidad de escenarios que pueden existir en dichas etapas.

## 4. Metodología

En este capítulo se presenta el marco metodológico utilizado en este trabajo. En primer lugar, dado que este es un estudio basado en datos de la literatura, se realizó una exhaustiva búsqueda bibliográfica en portales como *Web of Science*, Google y Google Académico, utilizando palabras claves como: “*Green hydrogen production*”, “Chile”, “*Life Cycle Assessment*”, “*Wind power*”, “*Solar PV panel*”, con el fin de obtener información sobre las tecnologías más utilizadas para así caracterizar las etapas del sistema y, además, identificar los respectivos impactos ambientales en la producción del hidrógeno verde.

En segundo lugar, para tener información detallada sobre los inventarios de materiales y energías de cada etapa del proceso, se utilizó una búsqueda bibliográfica similar a la mencionada, aunque utilizando palabras claves como “*Life Cycle Assessment*”, “*Multicrystalline silicon*”, “*Reverse osmosis*” y “*Alkaline Water electrolysis*”.

En tercer lugar, para presentar el modelo de la Declaración Ambiental de Producto para el hidrógeno verde, se utilizó las bases proporcionadas por la ISO 14025:2006 (ISO, 2006a), además, de las Reglas por Categoría de Producto para químicos básicos, a la cual el hidrógeno forma parte (EPD, 2021).

A modo de validación del modelo de DAP propuesto, se realiza un ejemplo de cálculo utilizando el inventario obtenido de datos de literatura y la metodología de Evaluación de Ciclo de Vida entregada por la ISO 14040. (ISO, 2006b).

Por último, para cuantificar los impactos ambientales, se utilizaron datos de Ecoinvent y Declaraciones Ambientales de Productos nacionales para los principales componentes como el acero y concreto. Además, se evaluó la sensibilidad de los resultados mediante cambios en los parámetros de variaciones de energía del electrolizador y producción de energía del aerogenerador y finalmente, el indicador de cambio climático se comparó con datos de literatura que abordan sistemas similares al estudiado.

A continuación, se entregan mayores detalles de aspectos metodológicos específicos, relacionados con los objetivos específicos de este trabajo.

## 4.1 Descripción del proceso de producción de hidrógeno verde

A partir de la información recopilada y considerando que este estudio tiene como límites de la cuna a la puerta, es decir, aborda el ciclo de vida desde la extracción de materias primas hasta la fabricación del producto, los principales componentes para su elaboración son:

- Generación de electricidad: La generación de electricidad se realiza mediante energía renovable, proveniente de generación eólica o generación solar fotovoltaica. Para el estudio solo se consideró la producción de electricidad mediante energía eólica, específicamente, un aerogenerador de capacidad nominal 2 MW.
- Producción de agua: Esta se obtuvo de la desalinización de agua de mar mediante ósmosis inversa.
- Electrolizador: La electrolisis se realizó mediante un electrolizador, el cual será específicamente tipo alcalino de capacidad nominal 1 MW.
- Transporte: Se consideró el transporte vía camión con un promedio de 500 km de viaje, para todos los materiales que son necesarios tanto para la producción del aerogenerador como del electrolizador.

## 4.2 Recopilación de información para inventario de flujos de materiales y energía

Empleando la búsqueda bibliográfica mencionada, se realizaron tablas resumen para la generación de electricidad mediante energía eólica y solar, producción de agua mediante ósmosis inversa y para el electrolizador alcalino en donde, se exponen un resumen de los principales inventarios de materiales y energía de cada uno. Así se tiene una visión de los rangos en los que se encuentran estos datos.

- Determinación del inventario del panel fotovoltaico policristalino de silicio

Aun cuando el presente trabajo solo considera la generación eólica como fuente de energía eléctrica para la producción de hidrógeno, se entrega información de base acerca de la generación fotovoltaica, la cual podrá ser incluida directamente en estudios posteriores.

Para determinar el inventario de paneles fotovoltaicos se utilizaron los estudios de Hong et al. (2016), Huang et al. (2017) y Rashedi et al. (2020). Tienen en común que exponen inventarios que abarcan desde la producción de las materias primas para la fabricación del panel solar hasta el montaje de la celda, con una vida útil de 25-30 años y una unidad funcional de 1 kW para todos.

- Determinación del inventario de energía eólica

Se utilizaron los inventarios de Nagashima et al. (2017) y Wang et al. (2019), además, del entregado por el análisis de ciclo de vida realizado por la empresa Vestas, para uno de sus aerogeneradores. Se tiene en común que consideran materiales para las etapas de construcción e instalación del aerogenerador, además, de una vida útil de 20 años. Sin embargo, están en base a diferentes unidades funcionales, por lo tanto, estos datos se deben

estandarizar para una unidad funcional común de 1 MW. Los detalles de esta estandarización se exponen en el anexo 8.5.

- Determinación del inventario de producción de agua por ósmosis inversa

Para la producción de agua, se utilizaron los estudios de Aljuwaisseri et al. (2023), Do Thi & tóth. (2023) y Fayyaz et al. (2023). Tienen en común que están basados en datos de plantas en operación de ósmosis inversa ubicadas en el Golfo Pérsico; todos estos estudios consideran una vida útil de 1 año y como unidad funcional 1 m<sup>3</sup> de agua desalinizada.

- Determinación del inventario del electrolizador alcalino

Se utilizaron los inventarios de Koj et al. (2017), Kolahchian et al. (2023) y Lee et al. (2021). Estos comparten que consideraron los materiales para las etapas de construcción y operación del electrolizador. Sin embargo, están en base a diferentes unidades funcionales ya que, los dos primeros estudios mencionados utilizan como base un electrolizador mientras que Lee et al. (2021), utiliza la producción de un 1 kg hidrógeno; además, de los diferentes periodos de ciclo de vida que establecen. Es por esto, que se estandariza en una unidad funcional común de 1 kg de hidrógeno producido; esta normalización se expone en el anexo 8.6.

### **4.3 Presentación del modelo de Declaración Ambiental de Producto**

Para presentar el modelo de DAP se estudió la Regla de Categoría de Producto de químicos básicos, en donde el hidrógeno pertenece al grupo de químicos básicos inorgánicos. Por lo tanto, se buscaron en la página EPD International, Declaración Ambientales de Producto pertenecientes a este grupo, así se escogieron las DAP para los productos peróxido hidrógeno y sales de sodio (carbonato de sodio y bicarbonato de sodio) como guía (EPD, 2021).

### **4.4 Validación del modelo de Declaración Ambiental de Producto**

Para la validación del modelo se utiliza como ejemplo de cálculo la producción de 1 kg de hidrógeno verde, así los inventarios calculados mencionados en la sección 4.2. Estos se utilizan aplicando una regla de corte de 95%, es decir, no se consideran los flujos que representen menos del 5% del total y la sumatoria no exceda el 5%. Así, los inventarios considerados abarcan los siguientes materiales:

- Electricidad por aerogenerador: Concreto y acero.
- Ósmosis inversa: Electricidad por aerogenerador y agua de mar.
- Electrolizador: Calor y electricidad, acero, cobre, níquel, electricidad por aerogenerador y agua desalinizada.

La información para los impactos ambientales se obtuvo de DAP de productores nacionales de acero y concreto, así como de la base de datos Ecoinvent con inventarios genéricos para diferentes productos. Estos datos fueron procesados mediante el software Simapro™ v9.1.1.7. Los impactos ambientales corresponden a la tipología de impactos ambientales intermedios, utilizando el modelo ReCiPe v2016 (Huijbregts et al., 2017). Las categorías incluidas en este estudio corresponden a las propuestas acerca de huella ambiental establecidas en la mayoría de las DAP publicadas y se presentan en la siguiente tabla, junto a los indicadores cuantitativos respectivos.

**Tabla 1. Indicadores de impacto intermedio del modelo ReCiPe considerados en este estudio.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

<b>Categoría de Impacto Intermedio ReCiPe</b>	<b>Indicador cuantitativo</b>
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq
Agotamiento capa de Ozono	Kg CFC-11 eq
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq
Eutroficación agua dulce	Kg PO <sub>4</sub> eq
Eutroficación marina	Kg N eq
Agotamiento recursos fósiles	Kg petróleo eq
Consumo de agua	m <sup>3</sup>

Dado que los flujos deben estar en función de la unidad funcional, es necesario parametrizar tanto el inventario de energía eólica como el de ósmosis inversa, así como el transporte.

- Parametrización del inventario del aerogenerador

En primera instancia es necesario tener el inventario en base a kWh generados. Para esto, se utilizó la plataforma Explorador Eólico, que es una herramienta que calcula el potencial de generación eléctrica anual de un aerogenerador instalado en Chile considerando factores, tales como el modelo del aerogenerador y el comportamiento del viento en relación con la ubicación y altura que este instalado (Ministerio de Energía, 2018). Para efectos del estudio, se supuso que el aerogenerador está ubicado a 100 metros de altura en la comuna de Los Ángeles, Región del Biobío. Esta opción se seleccionó considerando la capacidad de generación eólica y la cercanía a sectores industriales de interés y de facilidades portuarias para exportación del hidrógeno verde.

En la tabla 2, se muestra los detalles y la producción total de energía del aerogenerador considerando las características mencionadas. En el anexo 8.7 se presenta los cálculos para obtener el inventario del aerogenerador en base a kWh.

**Tabla 2. Datos obtenidos de Explorador Eólico para la producción de energía de un aerogenerador de 2 MW.**

**Fuente: Ministerio de Energía, 2018.**

Ubicación	Los Ángeles, Región Biobío
Vida útil	20 años
Modelo/Potencia	Vestas V110- 2.0 MW
Altura	100 m
Factor de planta	41,10%
Producción anual	7,2x10 <sup>6</sup> kWh
Producción total	1,44x10 <sup>8</sup> kWh

Luego, para referir los materiales de acero y concreto a la unidad funcional de 1 kg de hidrógeno se requirió considerar la energía necesaria tanto en la ósmosis inversa como para la operación del electrolizador. Para el caso de la ósmosis inversa, se realizó la parametrización utilizando la información de la cantidad de energía necesaria para producir 1m<sup>3</sup> de agua desalinizada y la cantidad de agua que requiere el electrolizador para producir 1 kg de H<sub>2</sub>. En caso de la energía necesaria para la operación del electrolizador, para la parametrización se requirió la cantidad de energía necesaria para la producción de 1 kg H<sub>2</sub>. El detalle del cálculo con los pasos a seguir se muestra en el anexo 8.8.

- Parametrización de la ósmosis inversa

En este inventario solo es necesario parametrizar la cantidad de agua de mar requerida. Para esto, bastó con utilizar la cantidad de agua necesaria para producir 1 kg de H<sub>2</sub>. El cálculo detallado se expresa en el anexo 8.9.

- Parametrización del transporte de materiales

Generalmente, los inventarios asociados al transporte de materiales que aparecen en las bases de datos, como Ecoinvent, están expresados en base a las toneladas-kilometro (tkm) requeridas para un cierto servicio de transporte. Para ello, se considera la cantidad de kilómetros a recorrer y se multiplica por la masa de materiales a transportar. En el caso de la construcción del aerogenerador fue necesario el transporte del acero y concreto, mientras que para la fabricación del electrolizador se requirió transporte del acero, níquel y cobre. Los detalles del cálculo se encuentran en el anexo 8.10.

- Determinación de impactos ambientales

Luego de tener el inventario total del sistema parametrizado en base a la unidad funcional, se determinó los impactos ambientales asociados al proceso. En la tabla 3 se detallan los insumos con sus correspondientes bases de datos.

**Tabla 3. Detalles de las bases de datos para los insumos considerados para el sistema en estudio.**  
Fuente: Elaboración propia.

<b>Insumo</b>	<b>Base de Datos</b>
Acero	DAP CAP Acero
Concreto	DAP Cementos Bío Bío
Níquel	DAP eq CAP Acero
Cobre	DAP eq CAP Acero
Electricidad	Ecoinvent y SEN 2022
Agua de mar	Ecoinvent
Transporte	Ecoinvent

Para el caso de materiales como el níquel y cobre se consideró una producción similar al acero, por lo tanto, se utilizó la DAP de CAP Acero, la cual entrega el perfil ambiental de 1 kg de barras de acero reforzado. Para el concreto, se utilizó también la DAP de Cementos Bío Bío, que entrega información para 1 m<sup>3</sup> de hormigón no armado, en este caso para su conversión a kg se consideró una densidad del concreto de 2.300 kg/m<sup>3</sup>.

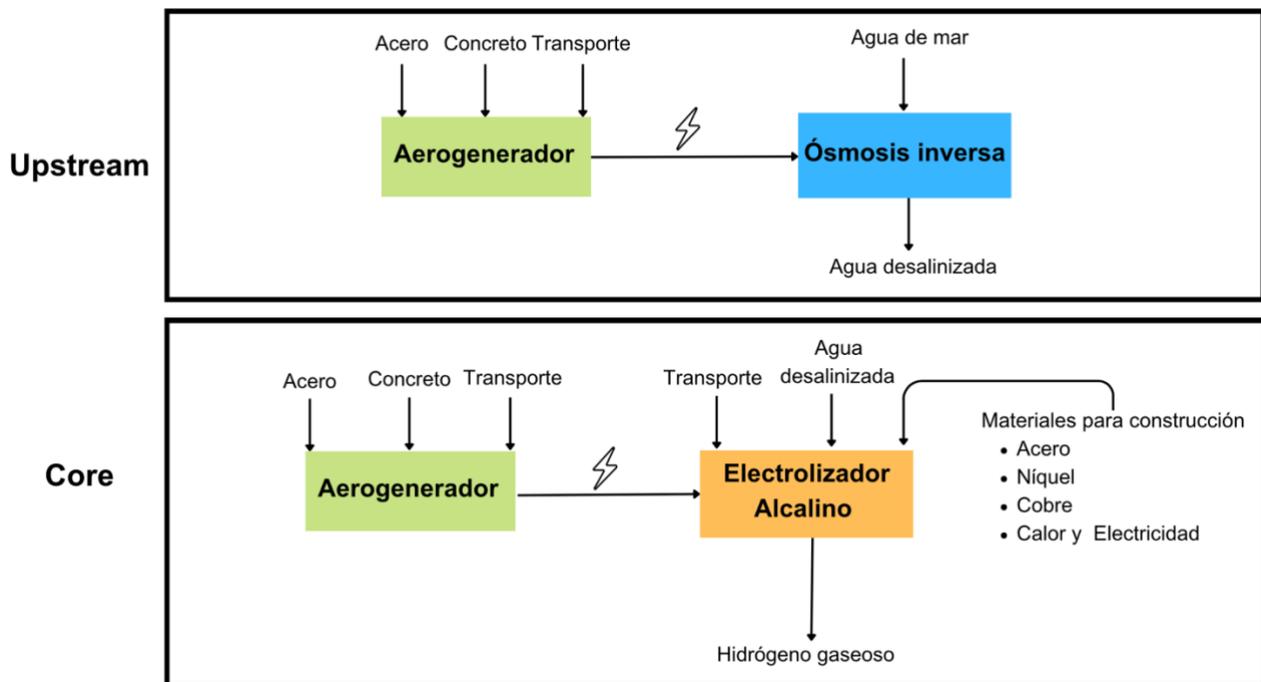
En caso de agua de mar y transporte se utilizó la fuente de datos original de Ecoinvent y se procesó mediante el software Simapro<sup>TM</sup>. Para el caso de la generación de electricidad, se adaptó dicha base de datos a la correspondiente a la matriz energética chilena con datos del consumo eléctrico nacional de 2022, utilizando las contribuciones porcentuales de cada fuente de generación energética obtenida de la página Generadoras de Chile (Generadoras de Chile, 2023), tal como se puede observar en el anexo 8.11.

## 5. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados de este trabajo. En primer lugar, se identifican las etapas del ciclo de vida para la producción de hidrógeno verde. En seguida, se resumen inventarios típicos de materiales y energía asociados a cada etapa de la producción de hidrógeno verde. Finalmente, se entrega una propuesta de modelo de Declaración Ambiental de Producto para la producción de hidrógeno verde, junto con un ejemplo de cálculo que ilustra su utilización.

### 5.1 Etapas del ciclo de vida de la producción de hidrógeno verde

Corresponde a los procesos que se consideran para la Evaluación de Ciclo de Vida. Para la Declaración Ambiental de Producto del hidrógeno verde, los límites del sistema a estudiar corresponden a un enfoque de la cuna a la puerta. Es decir, se consideran los procesos desde la extracción de los principales recursos naturales hasta la generación misma del producto, excluyendo los procesos post-producción, dada la amplia gama de opciones tecnológicas para el acondicionamiento del hidrógeno, transporte, distribución y uso final. En este caso, se consideran dos grandes etapas de ciclo de vida, tal como se ilustra en la figura 1:



**Figura 1. Esquema del proceso productivo para el hidrógeno verde.**  
Fuente: Elaboración propia.

- Etapa de procesos aguas arriba (*Upstream*): Abarca la producción del agua desalinizada por medio de ósmosis inversa, la cual requiere agua de mar y uso de electricidad, que se obtiene mediante energía eólica; además considera, el transporte de materias primas para la energía eólica.
- Etapa de procesos centrales (*Core*): Abarca los elementos necesarios para la producción de hidrógeno verde. Esta etapa comprende la operación y fabricación del

electrolizador alcalino, el cual requiere de electricidad generada por aerogeneradores, además considera el transporte de materias primas tanto para la energía eólica como para la fabricación del electrolizador.

## 5.2 Inventarios de materiales y energía asociados a cada etapa del ciclo de vida

Las tablas 4, 5, 6 y 7, resumen los inventarios típicos reportados en literatura para la producción de paneles fotovoltaicos policristalinos, aerogeneradores, ósmosis inversa y electrolizadores alcalinos, respectivamente.

### 5.2.1 Inventario para panel fotovoltaico policristalino de silicio

**Tabla 4. Resumen de inventario de materiales y energía para la producción de un panel fotovoltaico policristalino de silicio considerando como unidad funcional 1 kW.**

Fuente: Elaboración propia.

	Unidad	Rashedi et al., 2020	Huang et al., 2017	Hong et al., 2016	Promedio para este estudio
<b>Materiales</b>					
Arena de sílice	kg	37,8	18,1	59,7	39
Carbón	kg	29,3	44,8	-	37
Hidróxido de sodio	kg	4,3	3,5	26,9	12
Carburo de silicio	kg	18,9	18,1	14,2	17
Aluminio	kg	61,1	722,2	36,1	273
Vidrio solar/Cristal	kg	73,3	60,7	65,6	67
EVA (Etileno Vinil Acetato)	kg	7,4	21,4	19,0	16
Acero	kg	32,9	-	-	33
Agua	kg	1-551	6.472	7.830	5.284
<b>Energía</b>					
Electricidad	kWh	1.019	391	1.457	956
Gas natural	MJ	60,6	-	-	61
Vapor (150-200°C 0.5-0.8 Mpa)	kg	-	727	-	727
Gasolina	MJ	16,7	-	-	17
Coque de hulla	MJ	98,9	-	-	99
Combustible	kg	-	-	1,8	2

## 5.2.2 Inventario energía eólica

Tabla 5. Resumen de inventario de materiales para fabricación e instalación de un aerogenerador *onshore* considerando como unidad funcional 1 MW.

Fuente : Elaboración propia.

	Unidad	Nagashima et al., 2017	Vestas, 2022	Wang et al., 2019	Promedio para este estudio
<b>Materiales para fabricación</b>					
Acero y derivados	kg	1,1x10 <sup>5</sup>	1,1x10 <sup>5</sup>	1,1x10 <sup>5</sup>	1,1x10 <sup>5</sup>
Aluminio	kg	1,9x10 <sup>3</sup>	1,9x10 <sup>3</sup>	9,0x10 <sup>2</sup>	1,6x10 <sup>3</sup>
Cobre	kg	1,8x10 <sup>3</sup>	7,9x10 <sup>2</sup>	1,6x10 <sup>3</sup>	1,4x10 <sup>3</sup>
<b>Materiales para instalación</b>					
Acero	kg	1,6x10 <sup>4</sup>	1,9x10 <sup>4</sup>	1,4x10 <sup>4</sup>	1,6x10 <sup>4</sup>
Concreto	kg	4,9x10 <sup>5</sup>	3,6x10 <sup>5</sup>	4,0x10 <sup>5</sup>	4,2x10 <sup>5</sup>

## 5.2.3 Inventario producción de agua por ósmosis inversa

Para el inventario de la producción de agua mediante ósmosis inversa, solo se considera la electricidad y el consumo de agua de mar requerida para el proceso de producción. Los materiales utilizados para la fabricación de la membrana, así como los productos químicos requeridos para la limpieza de membranas, no se incluyen en el inventario debido a que sus valores son de orden de magnitud muy pequeños y no contribuyen significativamente a los impactos ambientales de la etapa.

Tabla 6. Resumen de inventario para la producción de 1 m<sup>3</sup> de agua desalinizada.

Fuente: Elaboración propia.

	Unidad	Fayyaz et al., 2023	Do Thi & tóth, 2023	Aljuwaisseri et al.,2023	Promedio para este estudio
Electricidad	kWh	3,6	4	4,45-5,2	4,3
Consumo agua de mar	m <sup>3</sup>	2,44	3	-	2,7

## 5.2.4 Inventario electrolizador alcalino

**Tabla 7. Resumen de inventarios para un electrolizador alcalino considerando la producción de un 1 kg de hidrógeno.**

Fuente : Elaboración propia.

	Unidad	Koj et al., 2017	Kolahchian et al., 2023	Lee et al., 2021	Promedio para este estudio
<b>Materiales fabricación</b>					
Acero	kg	$1 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$
Agua desionizada	kg	$4 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-3}$
Níquel	kg	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$
Agua descarbonizada	kg	$6 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-4}$
Cobre	kg	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
Vapor	KJ	$4 \times 10^{-2}$	-	$6 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$
Electricidad	kWh	$5 \times 10^{-4}$	-	$1 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-4}$
Calor	KJ	4,4	-	0,06	2,2
<b>Operación</b>					
Electricidad	kWh	50	50	48	49
Agua desionizada	kg	10	10	10	10
Hidróxido de potasio	kg	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-2}$	$7 \times 10^{-3}$

## 5.3 Propuesta de Declaración Ambiental de Producto

En base a la Regla de Categoría de Producto de químicos básicos y las Declaraciones Ambientales de Producto consultadas, se tiene que la estructura consta de tres fases principales. En primer lugar, se encuentra una fase donde se presentan las bases para realizar la Evaluación de Ciclo de Vida. Esta información se presenta en forma de relato descriptivo complementado con ilustraciones. Luego, se detalla una sección que aborda los indicadores del perfil ambiental, uso de recursos (energía y agua), el destino final de los flujos de residuos y co-productos. Esta información se presenta en tablas con datos cuantitativos y gráficos. Finalmente, se tiene una fase de interpretación, donde se presentan las conclusiones significativas sobre el producto en estudio con el objetivo de comprender su impacto ambiental e identificar posibles mejoras.

En la tabla 8 se presenta un resumen de los principales capítulos con sus detalles que debe contener una DAP para el hidrógeno verde.

**Tabla 8. Estructura general de la Declaración Ambiental de Producto para Hidrógeno Verde.**  
Fuente: Elaboración Propia

<b>Estructura Declaración Ambiental de Producto para el Hidrógeno Verde</b>	
<b>Información general para la ECV</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidad funcional y vida útil</li> <li>• Límites del sistema</li> <li>• Etapas de ciclo de vida (<i>Upstream</i> y <i>Core</i>)</li> <li>• Diagrama del sistema</li> <li>• Etapas de ciclo de vida excluidas (<i>Downstream</i>)</li> </ul>	
<b>Resultados del desempeño ambiental</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impactos ambientales</li> <li>• Uso de recursos</li> <li>• Flujo de residuos y salida</li> </ul>	
<b>Interpretación</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibles tendencias</li> <li>• Etapas críticas del sistema</li> <li>• Estrategias para mejorar el desempeño ambiental</li> <li>• Comparación con datos de la literatura</li> <li>• Sensibilidad del perfil ambiental</li> </ul>	
<b>Otra información adicional</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de gestión ambiental</li> <li>• Reporte de emisiones tóxicas</li> <li>• Hoja de datos de seguridad de materiales</li> </ul>	

A continuación, se realiza una descripción detallada de cada capítulo mencionado.

### **5.3.1 Información para la Evaluación de Ciclo de Vida**

Abarca la información de los siguientes parámetros:

- Unidad funcional y vida útil

La unidad funcional debe ser 1 kg de hidrógeno verde bajo las condiciones obtenidas en el proceso electroquímico. Para el caso de la vida útil del sistema, no se sigue una regla específica, por lo tanto, la cantidad de tiempo considerada dependerá de las condiciones específicas de la infraestructura productiva del proceso para el que se está realizando la DAP.

- Límites del sistema

En rigor, se preferiría un enfoque que abarque todo el proceso de producción, es decir, de la cuna a la tumba. Sin embargo, los límites dependerán de la situación específica ya que si

existe información acerca de los procesos post-producción (downstream), éstos deberían ser incluidos en la DAP.

- Etapas de ciclo de vida

Para efectos de presentación de información, el ciclo de vida del producto se divide en tres grandes etapas *upstream*, *core* y *downstream*; estas etapas se detallan en el ítem 5.1. En el caso particular presentado aquí, la etapa *downstream* no fue incluida, debido a la amplia gama de alternativas existentes para esa fase. No obstante, en caso de conocer los procesos de post-electrólisis, como, por ejemplo, condicionamiento, compresión y/o almacenamiento del hidrógeno, estos procesos podrán ser incluidos en la DAP.

- Diagrama del sistema

Para lograr una mejor visualización de que parte del sistema son considerados, se sugiere incorporar un diagrama ilustrativo.

- Etapas de Ciclo de vida excluidas

En caso de omisión de alguna etapa de ciclo de vida, se debe detallar cual es y la justificación de su omisión.

### **5.3.2 Resultados del Desempeño Ambiental**

En este ítem se entrega los resultados de los indicadores ambientales correspondientes a las categorías de impacto cambio climático, agotamiento de capa de ozono, acidificación terrestre, eutroficación de agua dulce y marina, potencial agotamiento de recursos fósiles y no fósiles (minerales y metales) y consumo de agua.

- Impactos ambientales

Generalmente, se entrega la información mediante una tabla que resume los impactos para las diferentes categorías tomando como referencia la unidad funcional (1 kg H<sub>2</sub>), especificando la etapa que los genera, como se observa en la tabla 9.

**Tabla 9. Tabla de indicadores ambientales para las etapas de *upstream*, *core* y *downstream*.  
Fuente: ETI SODA (2017) y Nouryon (2023).**

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Upstream</b>	<b>Core</b>	<b>Downstream</b>	<b>Total</b>
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq				
Agotamiento capa de Ozono	kg CFC-11 eq				
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq				
Eutroficación agua dulce	kg PO <sub>4</sub> eq				
Eutroficación marina	kg N eq				
Agotamiento recursos fósiles	Kg petróleo eq				
Consumo de agua	m <sup>3</sup>				

- Uso de recursos

En la tabla 10, se entrega información sobre el uso de energía primaria renovables y no renovables en donde se diferencia entre portador de energía o energía utilizada como materia prima, que es energía usada en el producto o embalaje. También, se informa en detalle la energía de fuente renovable y no renovable utilizada en materiales que hayan sido reciclados y, por último, se detalla el consumo de agua del sistema.

**Tabla 10. Tabla sobre el tipo de energía, materiales y uso de agua utilizados en las etapas de *upstream*, *core* y *downstream*.**

**Fuente: ETI SODA (2017) y Nouryon (2023).**

Parámetros		Unidad	Upstream	Core	Downstream	Total
Energía primaria de recursos renovables	Portador de energía	MJ, valor calorífico neto				
	Energía utilizada como materia prima					
	TOTAL					
Energía primaria de recursos no renovables	Portador de energía	MJ, valor calorífico neto				
	Energía utilizada como materia prima					
	TOTAL					
Materiales reciclados		Kg				
Energía secundaria de recursos renovables		MJ, valor calorífico neto				
Energía secundaria de recursos no renovables		MJ, valor calorífico neto				
Uso de agua		m <sup>3</sup>				

- Flujo de residuos y salida

En la tabla 11, se entrega información para los flujos de salida en base a su unidad funcional además, se detallan el destino final de los residuos considerando tres tipos, a saber, residuos peligrosos y no peligrosos desechados, y residuos radiactivos. Complementariamente, en la tabla 12 se describe los usos que pueden tener estos flujos.

**Tabla 11. Tabla de los flujos de salida de las etapas de *upstream*, *core* y *downstream* considerando su destino final como residuo**

**Fuente: ETI SODA (2017) y Nouryon (2023).**

Parámetros	Unidad	Upstream	Core	Downstream	Total
Residuos peligrosos desechados	kg				
Residuos no peligrosos desechados	kg				
Residuos radiactivos desechados	kg				

**Tabla 12. Tabla de los flujos de salida de la etapas de *upstream*, *core* y *downstream* considerando su uso.**  
**Fuente: ETI SODA (2017) y Nouryon (2023).**

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Upstream</b>	<b>Core</b>	<b>Downstream</b>	<b>Total</b>
Componentes para reutilización	kg				
Materiales para reciclaje	kg				
Materiales para recuperación de energía	kg				
Energía exportada, electricidad	MJ				
Energía exportada, térmica	MJ				

### **5.3.3 Interpretación**

Por último, la etapa de interpretación corresponde al análisis de los resultados presentados en formas de tablas y gráficos que detallan el desempeño ambiental del producto. El objetivo de esta etapa es identificar posibles tendencias, como mejoras con respecto a DAP anteriores y determinar que etapas del ciclo de vida del producto tienen un impacto ambiental significativo, lo que permite identificar áreas claves para oportunidades de mejora. Además de este análisis, en el caso de esta memoria, se lleva a cabo una comparación con estudios de ECV de la literatura, centrándose en el indicador de cambio climático. También, se analiza la sensibilidad del perfil ambiental frente a cambios en ciertos parámetros, como variaciones en la producción de electricidad del aerogenerador y en la cantidad de electricidad requerida por el electrolizador alcalino para la producción de hidrógeno.

### **5.3.4 Información adicional para incluir en la DAP**

La Declaración Ambiental de Producto puede abordar varios temas adicionales que complementen su contenido principal. Por ejemplo, se puede detallar si la organización cuenta con un sistema de gestión ambiental, el cual tiene como objetivo la mejora continua de las prácticas y acciones que implementa para mejorar su desempeño ambiental. Este sistema se rige por los estándares establecidos en la norma ISO 14001:2015 sobre sistemas de gestión ambiental (ISO, 2015).

Asimismo, la DAP puede proporcionar información detallada sobre las emisiones al aire, suelo y agua que pueden ser perjudiciales tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Esta información puede complementarse aún más al incluir las Hojas de Datos de Seguridad de los diferentes materiales utilizados en el proceso de fabricación, así como de los subproductos.

## **5.4 Ejemplo de cálculo**

Tomando como base la propuesta de Declaración Ambiental de Productos, indicada en el ítem 5.3, se realiza un ejemplo de cálculo tomando la producción de 1 kg de hidrógeno verde para una vida útil de 20 años con el objetivo de ilustrar la utilización de modelo propuesto.

### 5.4.1 Información para la Evaluación de Ciclo de Vida

- Unidad funcional y vida útil

La unidad funcional corresponde a 1 kg de hidrógeno verde para una vida útil de 20 años

- Límites del sistema y etapas de ciclo de vida

Para este ejemplo de cálculo, el enfoque es de la cuna a la puerta. Tal como se explicó en la sección 5.1, las etapas del ciclo de vida del hidrógeno verde que se considerarán en este estudio son las operaciones aguas arriba del proceso (*upstream*) y las del proceso principal de producción de hidrógeno propiamente tal (*core*). En la etapa *upstream*, se incluye la producción de agua desalinizada mediante ósmosis inversa, la cual requiere agua de mar y electricidad como insumos principales. En este trabajo, se supone que la electricidad proviene de energía eólica, cuyo inventario consta principalmente de acero, concreto y transporte de estos materiales.

Por su parte, la etapa *core* contempla la producción de hidrógeno verde, donde se requiere electricidad y el electrolizador alcalino. Este último utiliza insumos como acero, níquel, cobre, calor y electricidad para su construcción, además del transporte de estos materiales. En este estudio se supone que la electricidad proviene de energía eólica, la cual consta de los mismos elementos mencionados en la etapa *upstream*. La tabla 13 resume el inventario global utilizado como caso base en la presente memoria, elaborado a partir de los valores reportados en literatura mostrados en el ítem 5.2

**Tabla 13. Tabla inventario global para la producción de 1 kg de hidrógeno verde.**  
Fuente: Elaboración propia.

<b>Inventario de materiales y energía</b>	<b>Unidad</b>	<b>Upstream</b>	<b>Core</b>	<b>Total</b>
Agua de mar	m <sup>3</sup>	2,7x10 <sup>-2</sup>	0	2,7x10 <sup>-2</sup>
Acero	kg	7,6x10 <sup>-5</sup>	1,0x10 <sup>-1</sup>	1,0x10 <sup>-1</sup>
Concreto	kg	2,5x10 <sup>-4</sup>	2,9x10 <sup>-1</sup>	2,9x10 <sup>-1</sup>
Níquel	kg	0	1,5,10 <sup>-3</sup>	1,5,10 <sup>-3</sup>
Cobre	kg	0	1,6x10 <sup>-4</sup>	1,6x10 <sup>-4</sup>
Calor y electricidad	kWh	0	1,6x10 <sup>-3</sup>	1,6x10 <sup>-3</sup>
Transporte	tkm	1,6x10 <sup>-4</sup>	2,0x10 <sup>-1</sup>	2,0x10 <sup>-1</sup>

- Etapas de Ciclo de vida excluidas

Para este estudio, se excluye la etapa de aguas abajo (*downstream*), es decir, las fases posteriores a la electrolisis. Estas etapas comprenden los procesos de compresión, transporte, uso, entre otros.

## 5.4.2 Resultado perfil ambiental e interpretación

En este ítem, se expone el perfil ambiental de sistema en estudio mediante información tabulada de los impactos ambientales y uso de recursos naturales, complementando con gráficos para tener una mejor visualización. Las tablas 11 y 12 de flujo y residuos mencionada en el ítem 5.3.2 no se abordan aquí ya que en este trabajo se considera que la única salida de la fase de generación de hidrógeno verde es este producto. También, se lleva a cabo una comparación con estudios de la literatura con respecto al indicador del cambio climático y se consideran diferentes escenarios para entender mejor la sensibilidad de los resultados obtenidos.

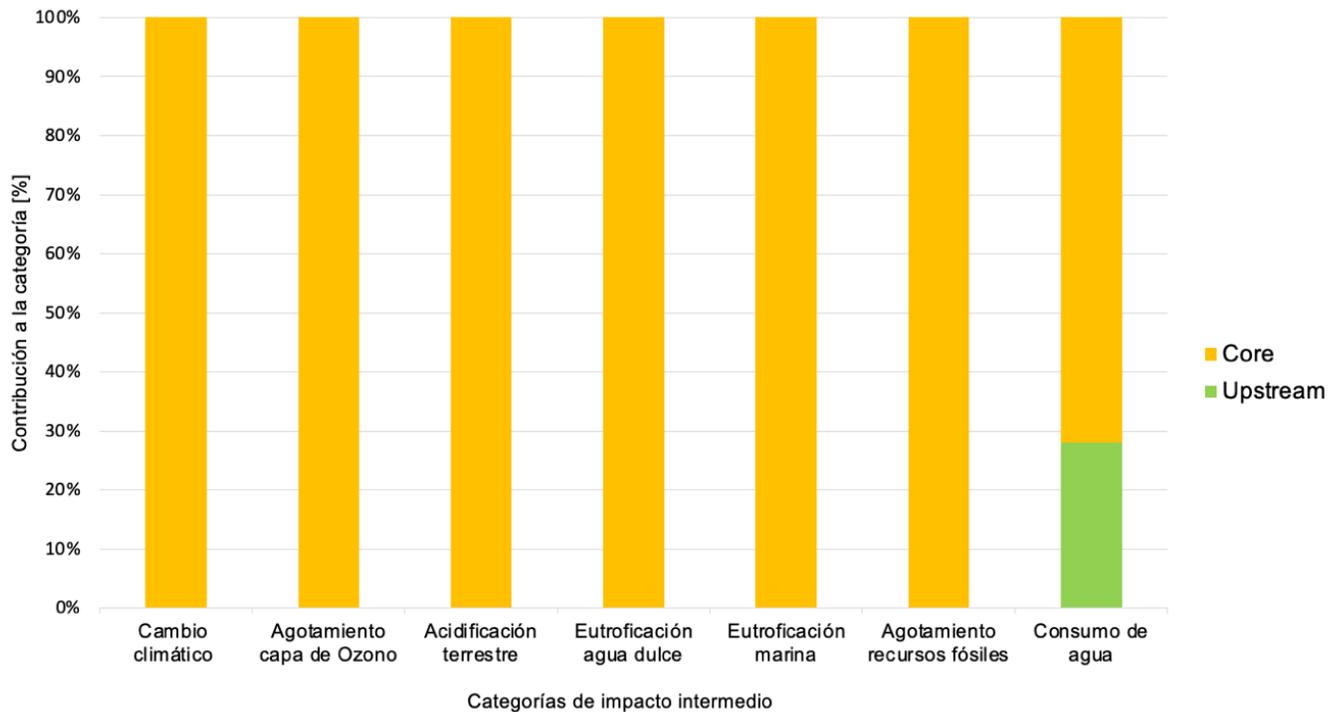
- Impactos ambientales

En la tabla 14 se resumen los impactos ambientales para el caso de estudio en las etapas de *core* y *upstream*.

**Tabla 14 . Impactos ambientales utilizando como ejemplo de cálculo la producción de 1 kg de hidrógeno.**

**Fuente: Elaboración propia.**

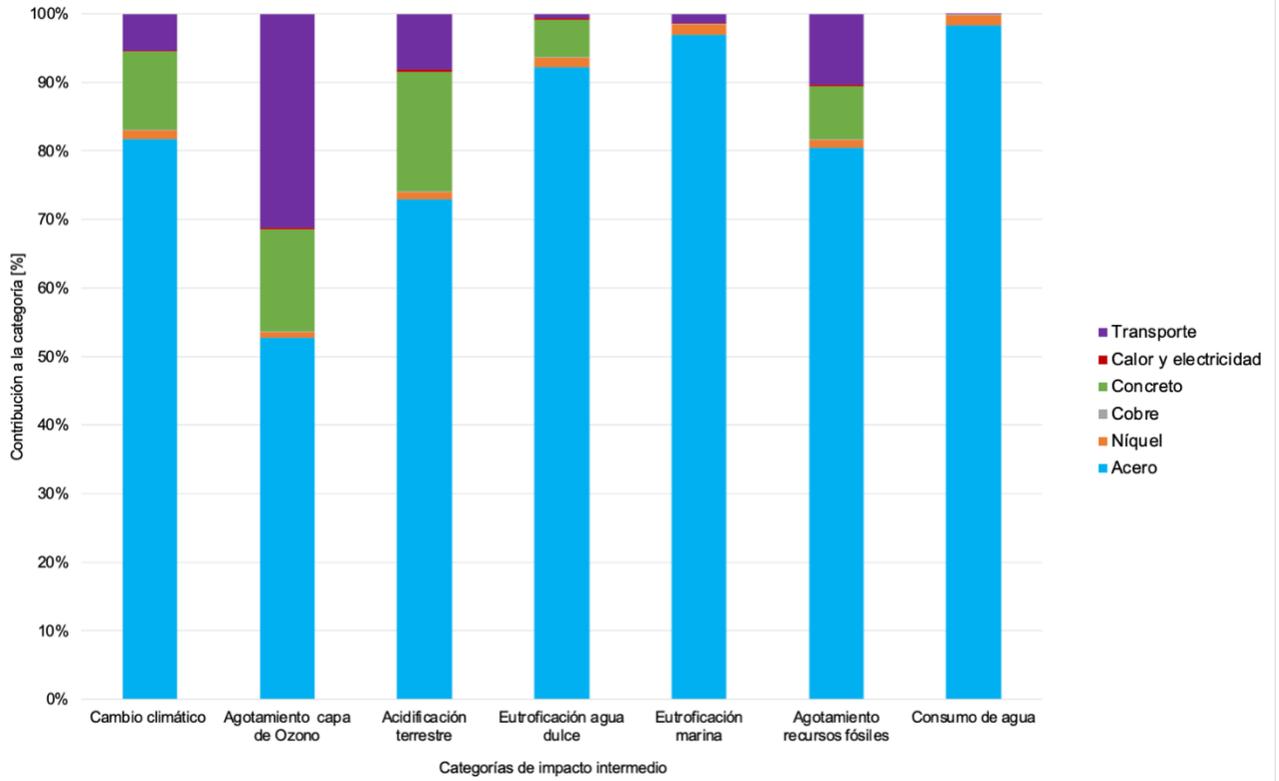
<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Upstream</b>	<b>Core</b>	<b>Total</b>
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub>	2,4x10 <sup>-4</sup>	3,2x10 <sup>-1</sup>	3,2x10 <sup>-1</sup>
Agotamiento capa de Ozono	Kg CFC11	8,3x10 <sup>-12</sup>	1,1x10 <sup>-8</sup>	1,1x10 <sup>-8</sup>
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub>	7,5x10 <sup>-7</sup>	9,9x10 <sup>-4</sup>	9,9x10 <sup>-4</sup>
Eutroficación agua dulce	kg PO <sub>4</sub>	4,3x10 <sup>-7</sup>	5,8x10 <sup>-4</sup>	5,8x10 <sup>-4</sup>
Eutroficación marina	Kg N	1,9x10 <sup>-7</sup>	2,6x10 <sup>-4</sup>	2,6x10 <sup>-4</sup>
Agotamiento recursos fósiles	kg petróleo eq	4,7x10 <sup>-5</sup>	6,3x10 <sup>-2</sup>	6,3x10 <sup>-2</sup>
Consumo de agua	m <sup>3</sup>	2,7x10 <sup>-2</sup>	7,0x10 <sup>-2</sup>	9,7x10 <sup>-2</sup>



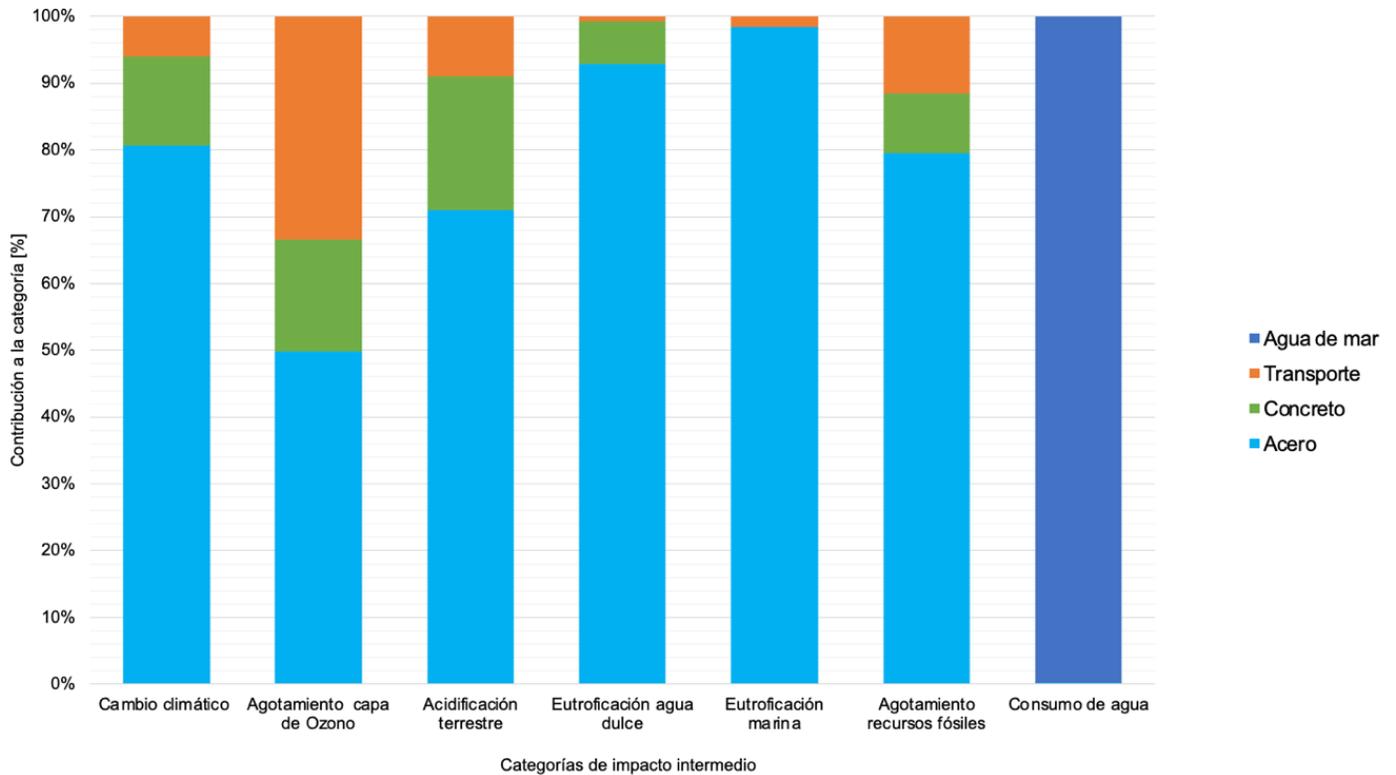
**Figura 2. Contribución porcentual de las etapas de *core* y *upstream* a los impactos ambientales intermedios.**  
Fuente: Elaboración propia.

De la figura 2, se observa que en todas las categorías, la etapa de *core* es la que más contribuye a las diferentes categorías de impacto, a excepción del indicador de consumo de agua donde toma un poco de relevancia el *upstream*, contribuyendo en aproximadamente un 30% ya que, en esta etapa es donde se requiere el uso agua de mar para la producción de agua desalinizada. La figura 3 muestra los materiales que componen la etapa *core*, donde se puede ver que el acero predomina en seis categorías y toma un poco menos de importancia en la categoría de agotamiento de capa de ozono, donde contribuye aproximadamente en un 50% ; esta tendencia también se observa en la figura 4, que muestra los detalles de la etapa *upstream*.

La contribución del acero en la etapa de *upstream* se debe a la generación de electricidad mediante energía eólica. Para el caso de la etapa de *core*, la contribución proviene en gran medida de la generación de electricidad por medio de energía eólica y de la construcción del electrolizador. Lo anterior se debe a que en ambas etapas se usa gran cantidad de acero requerido para la fabricación de las piezas del aerogenerador y en la construcción de los cimientos para su instalación. Por lo tanto, tener procesos siderúrgicos con mayor eficiencia energética permitiría disminuir la contribución a los diferentes impactos ambientales.



**Figura 3. Contribución de los inventarios de materiales, energía y transporte a la etapa de core.**  
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 4 . Contribución de los inventarios de materiales, energía y transporte a la etapa de *upstream*. Fuente: Elaboración propia.**

- Uso de recursos naturales

En la tabla 15, se expone el uso de recursos naturales para la etapa de *upstream*, aquí solo se tiene como recurso el agua de mar necesario para el proceso de desalinización, en el caso del *core*, se tiene el calor y electricidad necesaria para la fabricación del electrolizador la cual como proviene de la matriz energética nacional, se tiene que aproximadamente un 55% proviene de recursos renovables. Al igual, como no es energía utilizada directamente para el producto (hidrógeno), cae en ítem de portador de energía. Para el caso de materiales reciclados, no aplican ya que el presente estudio de caso no los considera.

**Tabla 15. Impactos ambientales para la producción de 1 kg de hidrógeno.**  
Fuente: Elaboración propia.

Parámetros		Unidad	Upstream	Core	Total
Energía primaria de recursos renovables	Portador de energía	MJ, valor calorífico neto	0	$3,1 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{-3}$
	Energía utilizada como materia prima		0	0	0
	TOTAL		0	$3,1 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{-3}$
Energía primaria de recursos no renovables	Portador de energía	MJ, valor calorífico neto	0	$2,5 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$
	Energía utilizada como materia prima		0	0	0
	TOTAL		0	$2,5 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$
Uso de agua		m <sup>3</sup>	$2,7 \times 10^{-2}$	0	$2,7 \times 10^{-2}$

### 5.4.3 Variación del consumo de energía del electrolizador

Como el suministro de energía tiene una gran importancia en el perfil ambiental, para evaluar qué tan sensible es el sistema ante variaciones, se procede a comparar los impactos ambientales, variando en un  $\pm 20\%$  el consumo de energía del electrolizador, considerando que el caso base consume 49 kWh/kg H<sub>2</sub>. En la tabla 16 se presenta la variación en porcentaje del perfil ambiental con respecto al caso base.

**Tabla 16. Variación porcentual ante el cambio de  $\pm 20\%$  en el consumo de energía del electrolizador.**  
Fuente: Elaboración propia.

Parámetros	Aumento de consumo energía electrolizador	Disminución de consumo energía electrolizador
Cambio climático	17%	-17%
Agotamiento capa de Ozono	18%	-18%
Acidificación terrestre	17%	-17%
Eutroficación agua dulce	17%	-17%
Eutroficación marina	17%	-17%
Agotamiento recursos fósiles	17%	-17%
Consumo de agua	12%	-12%

Se puede ver que casi todos los indicadores tienen una sensibilidad similar y es prácticamente proporcional a la variación de energía que tiene el electrolizador. Excepto para el caso de consumo de agua, donde se verifica una menor variación en comparación con los otros indicadores, ya que un gran porcentaje del impacto ambiental tiene relación con el consumo de agua de mar que se utiliza en el proceso de ósmosis inversa que tiene relación con la etapa de *upstream*.

#### 5.4.4 Variación en la generación de energía eólica

Se procede a comparar los impactos ambientales variando la ubicación del aerogenerador utilizando la plataforma explorador eólico. Como se mencionó en el ítem 4.4, para el caso base, el aerogenerador está ubicado en Los Ángeles región del Biobío, pero existen proyectos de generación de hidrógeno verde que consideran instalarse en Punta Arenas, región Magallanes. Para dimensionar el efecto de tal alternativa de ubicación, se cuantificaron los impactos ambientales correspondientes a dicha opción.

En la tabla 17, se comparan las condiciones básicas de la producción de energía eólica para los casos de ubicación en Los Ángeles y Punta Arenas, obtenidas en base a la herramienta Explorador Eólico. A modo de comparación, se incluye el caso de la producción eólica, considerando el promedio mundial. Mayores detalles de cálculo se encuentran en el anexo 8.12.

**Tabla 16. Datos obtenidos de Explorador Eólico para calcular la producción de energía de un aerogenerador de 2 MW considerando diferentes escenarios.**

Fuente: Elaboración propia.

Ubicación	Los Ángeles, Región Biobío (Caso base)	Punta Arenas, Región Magallanes	Producción global promedio
Vida útil	20 años	20 años	20 años
Modelo/ potencia	Vestas V110- 2.0 MW	Vestas V110- 2.0 MW	2 MW
Altura	100	100	-
Factor de planta	41,10%	51,60%	33%
Producción anual	7,2x10 <sup>6</sup> kWh	9,0x10 <sup>6</sup> kWh	5,8x10 <sup>6</sup> kWh
Producción total	1,4x10 <sup>8</sup> kWh	1,8x10 <sup>8</sup> kWh	1,2x10 <sup>8</sup> kWh

Se puede observar que en Los Angeles y Punta Arenas se tienen altos factores de planta, es decir, los aerogeneradores tienen una alta eficiencia. Este factor compara la energía que produce realmente el aerogenerador versus la capacidad máxima de energía que podría producir teóricamente. Considerando que el factor de planta promedio para un aerogenerador es 33% como se observa en el caso de producción global promedio, los casos nacionales son significativamente superiores.

En la tabla 18, se presenta la variación en porcentaje del perfil ambiental con respecto al caso base.

**Tabla 17. Variación porcentual ante el cambio de escenario en la generación de energía de un aerogenerador, respecto al caso base (Los Ángeles).  
Fuente: Elaboración propia.**

<b>Parámetros</b>	<b>Puntas Arenas, Región Magallanes</b>	<b>Producción global promedio</b>
Cambio climático	-17%	20%
Agotamiento capa de Ozono	-18%	21%
Acidificación terrestre	-18%	20%
Eutroficación agua dulce	-17%	19%
Eutroficación marina	-17%	19%
Agotamiento recursos fósiles	-17%	20%
Consumo de agua	-12%	14%

Se puede observar de la tabla 18 que la cantidad de generación eléctrica de un aerogenerador tiene un impacto significativo en el perfil ambiental del sistema. Como se expone en la tabla 17, el factor de planta del caso base en comparación con Punta Arenas aumenta aproximadamente en un 10%. Como se puede observar en la tabla 18, el impacto ambiental disminuye casi el doble del factor de planta. Este mismo fenómeno se observa en el caso de la producción global promedio, donde el factor de planta disminuye aproximadamente en un 8%, y el impacto ambiental aumenta en promedio el doble del factor de planta, en todas las categorías de impacto.

Este resultado ilustra cuantitativamente el papel fundamental que juega la electricidad en el sistema en estudio, ya que se utiliza tanto en la producción de agua desalinizada como en el proceso de electrólisis para generar hidrógeno. Por lo tanto, para producir hidrógeno verde con un menor impactor ambiental, es necesario contar con aerogeneradores que tengan una alta eficiencia de generación eléctrica.

#### **5.4.5 Comparación del indicador de cambio climático con datos de la literatura**

En esta memoria, se lleva a cabo una comparación del indicador de cambio climático con estudios similares al utilizado en este trabajo. Por ejemplo, el estudio de Ghandehariun et al. (2016) donde los límites del sistema abarcan desde la generación de electricidad mediante un aerogenerador de 3 MW (*onshore*), la producción de hidrógeno mediante un electrolizador alcalino hasta la compresión y transporte de éste, para una unidad funcional de 1 kg de hidrógeno. De manera similar, el estudio de Valente et al. (2020), abarca como límites del sistema desde la producción de electricidad mediante energía eólica, la producción de hidrógeno mediante un electrolizador alcalino e incluye la etapa de compresión, utilizando España como el país de referencia y 1 kg de hidrógeno como unidad funcional. Además, el análisis de Cho et al. (2023) que proporciona un promedio del indicador de cambio climático para la producción de hidrógeno mediante electrolisis eólica, utilizando datos de diversas

publicaciones de Evaluaciones de Ciclo de Vida publicadas entre los años 2008 y 2021. En la tabla 19 se exponen los resultados de los estudios mencionados y del de esta memoria.

**Tabla 18. Resultado de indicador de cambio climático para diferentes estudios.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Parámetro	Ghandehariun et al.,2016	Valente et al., 2020	Cho et al., 2023	Resultado memoria (caso Los Ángeles)
Cambio climático [kg CO <sub>2</sub> /kg H <sub>2</sub> ]	0,68	0,43	1,29 ± 1,15	0,32

Se observa que el impacto ambiental en la categoría cambio climático calculado para el caso de Los Ángeles utilizado en esta memoria, bajo condiciones nacionales, es significativamente menor al reportado en la literatura. Si bien algunos de esos estudios incluyen la fase de compresión en la post-producción, su incidencia en la huella de carbono no es suficiente como para justificar las diferencias encontradas. Esto sugiere que Chile tiene la capacidad de producir hidrógeno verde con un menor impacto ambiental en la categoría cambio climático, lo que representa una ventaja competitiva en comparación con otros productores de hidrógeno en el contexto internacional.

## 6. Conclusiones

La producción de hidrógeno verde por medio de electrólisis del agua, utilizando energías de fuentes renovables, implica el uso de recursos naturales y generación de residuos, en diferentes etapas del ciclo de vida. La Declaración Ambiental de Producto (DAP) del hidrógeno verde permite entregar información validada respecto a los principales aspectos e impactos ambientales asociados a su elaboración. Los límites del sistema de producción de hidrógeno verde incluyen la generación de electricidad mediante energía eólica necesaria para la desalinización y la electrólisis del agua, así como la elaboración de los principales materiales de construcción de la infraestructura para generación de electricidad y el sistema electroquímico.

El ciclo general se estructura en tres etapas, a saber, procesos aguas arriba (*upstream*), procesos principales (*core*) y procesos post-producción (*downstream*). Este último no es abordado en la presente propuesta debido a la amplia diversidad de opciones tecnológicas existentes para el condicionamiento, transporte y utilización del hidrógeno verde.

Los principales inventarios de materias primas y energía asociados con estas etapas incluyen, para la etapa *upstream*, el acero y el concreto utilizados en la fabricación e instalación del aerogenerador, así como el agua de mar necesaria para la desalinización. En cuanto a la etapa *core*, esta se compone principalmente de acero, cobre y níquel, así como calor y electricidad necesarios para la fabricación del electrolizador alcalino, además de los materiales necesarios para el aerogenerador.

Con respecto al modelo de Declaración Ambiental de Producto propuesto, este se estructura en tres partes. En la primera, se presentan las bases metodológicas para realizar la Evaluación de Ciclo de Vida, de acuerdo a la normas ISO 14040:2006, donde se incluye información relacionada con la unidad funcional, vida útil, límites del sistema y supuestos generales. La segunda etapa consiste en la representación mediante tablas y gráficos de los indicadores de impacto ambiental, así como de los detalles sobre el uso de recursos naturales y el destino final de los residuos y co-productos. Luego, sigue la etapa de interpretación, en la cual se entrega información acerca de lo que se infiere de los resultados obtenidos, destacando las etapas críticas del sistema mediante la exposición de los indicadores de más importancia y sus tendencias. También se realiza, de manera optativa, un análisis de sensibilidad para los parámetros más relevantes, como la electricidad requerida por el electrolizador para su operación y la cantidad de electricidad que es capaz de generar un aerogenerador. Con estos datos, se puede proponer estrategias para mejorar el desempeño ambiental del hidrógeno.

En base a los resultados obtenidos en la validación para el caso base de producción de hidrógeno verde para las condiciones naciones, se concluye que en la mayoría de los indicadores, su mayor porcentaje se concentra en la etapa de *core*, específicamente en la fabricación del acero. En cuanto al indicador de consumo de agua, se distribuye de manera similar entre las etapas de *upstream* y *core*. Para la etapa *upstream*, se debe principalmente por el consumo de agua de mar, mientras que en la etapa de *core* se debe a su uso en la fabricación del acero requerido para la infraestructura.

El análisis de sensibilidad permite concluir que los impactos ambientales son más sensibles ante cambios en la capacidad de generación de energía del aerogenerador y, en menor medida, a la cantidad de electricidad requerida por la operación del electrolizador. Se puede notar que al aumentar la eficiencia de generación del aerogenerador, lo cual se refleja en el factor de planta, los impactos ambientales disminuyen significativamente con respecto al caso base.

Al comparar el indicador de cambio climático con datos de la literatura, se evidencia que Chile tiene una marcada ventaja competitiva, ya que tiene el potencial de producir un hidrógeno con menor costo ambiental. Esto se atribuye a que se cuenta con un gran potencial eólico, como se refleja en sectores como Los Ángeles, en la Región del Biobío o Punta Arenas, en la Región de Magallanes, donde el factor de planta alcanza el 40% y el 50%, respectivamente, en comparación con el promedio mundial de 33%. Estos datos refuerzan la idea de que Chile puede convertirse en unos de los principales productores de hidrógeno verde a nivel mundial, debido a su mayor competitividad ambiental.

Se puede concluir que una Declaración Ambiental de Producto para la producción de hidrógeno verde en Chile, siguiendo los lineamientos de la norma ISO 14025, permite evidenciar de manera objetiva dicha ventaja competitiva en el mercado internacional.

## 7. Referencias

- Ah2VBiobío. (2021). Manual del Hidrógeno Verde. Recuperado, 10 de Septiembre de 2023 de <https://www.ah2vbiobio.cl>.
- Aljuwaisseri, A., Aleisa, E., & Alshayji, K. (2023). Environmental and economic analysis for desalinating seawater of high salinity using reverse osmosis: a life cycle assessment approach. *Environment Development and Sustainability*, 25(5), 4539–4574.
- CAP Acero. (2020). Environmental Product Declaration for steel reinforcing bar. EPD registration number: S-P-02002. Recuperado, 20 de Octubre de 2023 de <https://www.environdec.com/library/?Epd=18374>
- Cementos Bio Bio A.S. (2019). Environmental Product Declaration for Ready-Mix Concrete. EPD registration number: S-P-01722. Recuperado, 20 de Octubre de 2023 de <https://www.environdec.com/library/epd1722>
- Cho, H. H., Strezov, V., & Evans, T. J. (2023). A review on global warming potential, challenges and opportunities of renewable hydrogen production technologies. *Sustainable Materials and Technologies*, 35(e00567), e00567.
- Do Thi., H. T., & tóth, A.J.(2023). Investigation of carbon footprints of three desalination technologies: Reverse osmosis (RO), multi-stage flash distillation (MSF) and multi-effect distillation (MED). *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 67(1), 41-48.
- EPD (2021). International EPD System. Product category classification: Basic Chemicals. Recuperado, 15 Diciembre 2023 de <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/e07abf16-6efc-4abd-a2d8-08db196e9a1c/Data>
- ETI SODA (2017). Environmental Product Declaration for natural soda and sodium bicarbonate. EPD registration number: S-P-01129. Recuperado, 10 de Enero de 2024 de <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/f296cc91-ee7-47b1-8b02-57e4a8903d52/Data>
- Fayyaz, S., Khadem Masjedi, S., Kazemi, A., Khaki, E., Moeinaddini, M., & Irving Olsen, S. (2023). Life cycle assessment of reverse osmosis for high-salinity seawater desalination process: Potable and industrial water production. *Journal of Cleaner Production*, 382(135299), 135299.
- Gao, C., Zhu, S., An, N., Na, H., You, H., & Gao, C. (2021). Comprehensive comparison of multiple renewable power generation methods: A combination analysis of life cycle assessment and ecological footprint. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147(111255), 111255.

- Germescheidt, R.L., Moreira, D.E.B., Yoshimura, R.G., Gasbarro, N.P., Datti, E., dos Santos, P.L., & Bonacin, J.A. (2021). Hydrogen Environmental Benefits Depend on the Way of Production: An Overview of the Main Processes Production and Challenges by 2050. *Advanced Energy Sustainability Research*, 2(10).
- Generación eléctrica en Chile. (2023). Generadoras de Chile. Recuperado, 10 de Enero de 2024 de <https://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>.
- Ghandehariun, S., & Kumar, A. (2016). Life cycle assessment of wind-based hydrogen production in Western Canada. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(22), 9696–9704.
- Hong, J., Chen, W., Qi, C., Ye, L., & Xu, C. (2016). Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China. *Solar Energy*, 133, 283–293.
- Huang, B., Zhao, J., Chai, J., Xue, B., Zhao, F., & Wang, X. (2017). Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. *Solar Energy*, 143, 132–141.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe v2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147.
- ISO. (2006a). International Standardization Organization. (2006). ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures. International Organization for Standardization, ISO. Geneva, Switzerland.
- ISO. (2006b). International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040:2006 Environmental management: life cycle assessment; Principles and Framework. International Organization for Standardization, ISO. Geneva, Switzerland.
- ISO. (2015). International Organization for Standardization. (2015). ISO 14001:2015 Environmental management: life cycle assessment; Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization, ISO. Geneva, Switzerland.
- Koj, J., Wulf, C., Schreiber, A., & Zapp, P. (2017). Site-dependent environmental impacts of industrial hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Energies*, 10(7), 860.
- Kolahchian Tabrizi, M., Famiglietti, J., Bonalumi, D., & Campanari, S. (2023). The carbon footprint of hydrogen produced with state-of-the-art photovoltaic electricity using life-cycle assessment methodology. *Energies*, 16(13), 5190.
- Lee, B., Cho, H.-S., Kim, H., Lim, D., Cho, W., Kim, C.-H., & Lim, H. (2021). Integrative techno-economic and environmental assessment for green H<sub>2</sub> production by alkaline water electrolysis based on experimental data. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106349.
- Ministerio de Energía. (2018). Explorador eólico. Recuperado, 20 Octubre de 2023 de <https://eolico.minenergia.cl/potencia>

- Nagashima, S., Uchiyama, Y., & Okajima, K. (2017). Hybrid input–output table method for socioeconomic and environmental assessment of a wind power generation system. *Applied Energy*, 185, 1067–1075.
- Nouryon (2023). Environmental Product Declaration for hydrogen peroxide. EPD registration number: S-P-11034. Recuperado, 10 de Enero de 2024 de <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/3b2ea76b-ecd7-44ef-88a1-08dbc3e797a5/Data>
- Rashedi, A., & Khanam, T. (2020). Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27(23), 29075–29090.
- Sanz, M. A., & Miguel, C. (2013). The role of SWRO Barcelona-Llobregat Plant in the water supply system of Barcelona Area. *Desalination and Water Treatment*, 51(1–3), 111–123.
- Valente, A., Iribarren, D., & Dufour, J. (2017). Life cycle assessment of hydrogen energy systems: a review of methodological choices. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(3), 346–363.
- Valente, A., Iribarren, D., & Dufour, J. (2020). Prospective carbon footprint comparison of hydrogen options. *The Science of the Total Environment*, 728(138212), 138212.
- Velazquez Abad, A., & Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterization initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, 138(111300), 111300.
- Vestas. (2022). Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore Enventus V150-6.0 MW Wind Plant. Recuperado, 20 de Septiembre de 2023 de <https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA%20of%20Electricity%20Production%20from%20an%20onshore%20EnVentus%20V150-6.0.pdf.coredownload.inline.pdf>
- Vicuña, S., Daniele, L., Farías, L., González, H., Marquet, P. A., Palma-Behnke, R., Stehr, A., Urquiza, A., Wagemann, E., Arenas-Herrera, M. J., Bórquez, R., Cornejo-Ponce, L., Delgado, V., Etcheberry, G., Fragkou, M. C., Fuster, R., Gelcich, S., Melo, O., Monsalve, T., ... Winckler, P. (2022). Desalinización: Oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile. Comité Asesor Ministerial Científico sobre Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Wang, S., Wang, S., & Liu, J. (2019). Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 210, 804–810.
- Zurita, A., Castillejo-Cuberos, A., García, M., Mata-Torres, C., Simsek, Y., García, R., Antonanzas-Torres, F., & Escobar, R.A. (2018). State of the art and future prospects for solar PV development in Chile. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 701-727.

## 8. Anexos

Anexo 8.1 Gráficos de la distribución porcentual de tecnologías fotovoltaica en Chile.....	36
Anexo 8.2 Diagrama general para la producción de un panel de silicio policristalino.....	37
Anexo 8.3 Sistema de desalinización de agua de mar .....	38
Anexo 8.4 Esquema de un electrolizador alcalino .....	39
Anexo 8.5 Estandarización inventario energía eólica para unidad 1 MW .....	39
Anexo 8.6 Estandarización inventario electrolizador alcalino para unidad 1 kg hidrógeno producido.....	40
Anexo 8.7 Parametrización del inventario del aerogenerador en base kWh .....	40
Anexo 8.8 Parametrización del inventario del aerogenerador en base 1 kg hidrógeno producido.....	41
Anexo 8.9 Parametrización del inventario de la osmosis inversa en base 1 kg de hidrógeno producido.....	42
Anexo 8.10 Parametrización del transporte de materiales en base 1 kg de hidrógeno producido.....	42
Anexo 8.11 Matriz energética chilena para el año 2022 .....	43
Anexo 8.12 Calculo producción global promedio de un aerogenerador .....	43
Anexo 8.13 Impactos ambientales intermedios para ubicación en Punta Arenas .....	44
Anexo 8.14 Impactos ambientales intermedios para producción global promedio generación energía eólica .....	44

## 8.1 Gráficos de la distribución porcentual de tecnologías fotovoltaica en Chile

En la figura 5, se observa la distribución de las diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos utilizados para la producción de energía solar considerando datos de informes del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) de plantas en operación y en desarrollo del año 2018.

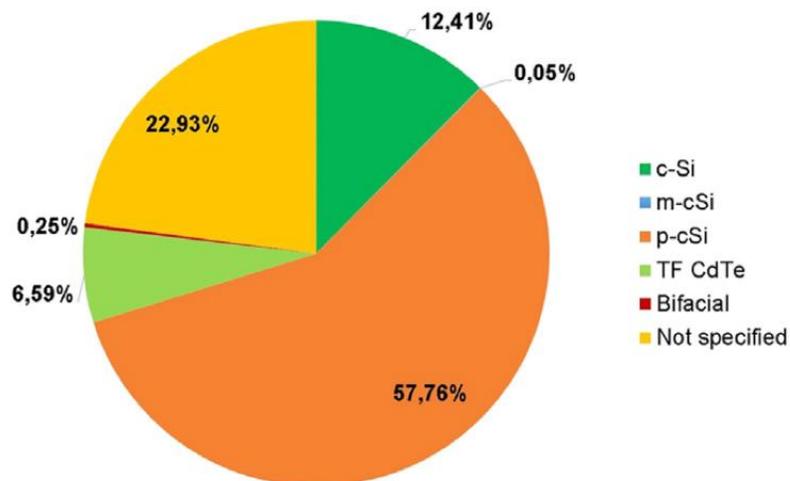
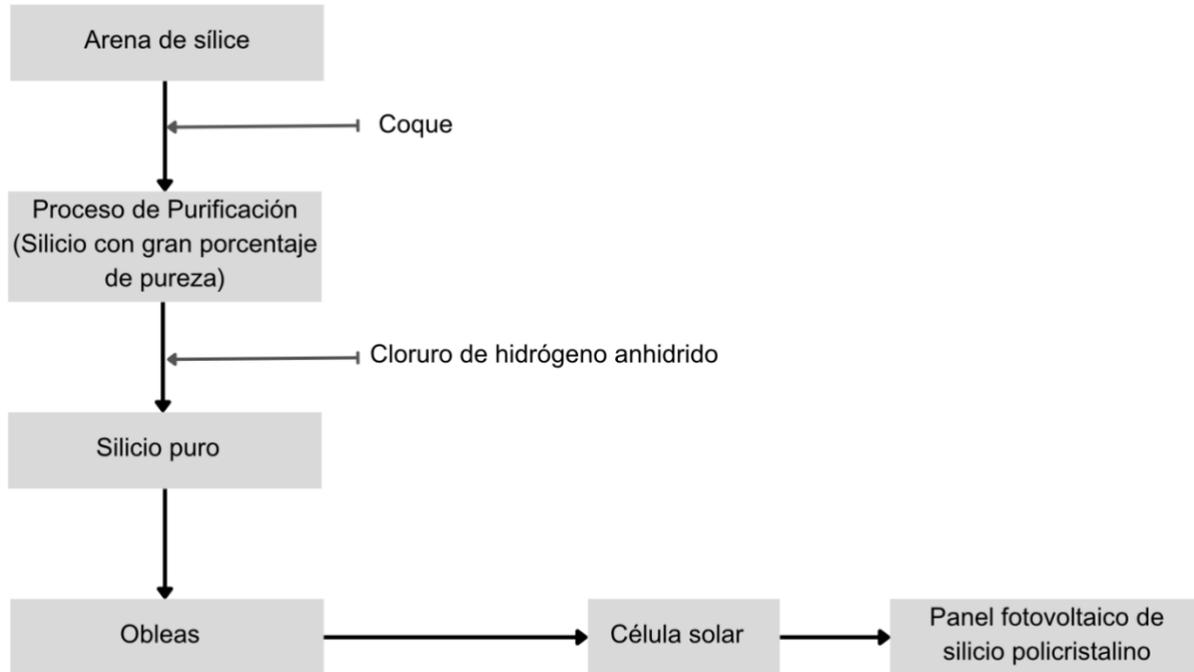


Figura 5. Distribución porcentual de las diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos utilizadas para la producción de energía solar en Chile para el año 2018.

Fuente: Zurita et al., 2018.

## 8.2 Diagrama general para la producción de un panel de silicio policristalino



**Figura 6. Diagrama para la producción un panel de silicio policristalino.**  
Fuente: Elaboración Propia.

### 8.3 Sistema de desalinización de agua de mar

Una planta de desalinización normalmente incluye etapas como: la toma de agua de alimentación que corresponde a agua de mar o agua salobre donde mediante bombas se envía a un pretratamiento. En esta etapa, se filtra para eliminar sólidos mediante filtros físicos y además, utilizando químico. Luego sigue la etapa de desalinización donde mediante tecnología de ósmosis inversa u otras, se elimina las sales disueltas del agua, donde se obtiene un permeado, el agua deseada y un agua de rechazo o salmuera que tiene concentraciones mayores de sal que el agua de alimentación. Para el caso del permeado esto se lleva a un acondicionamiento, donde se le realiza un tratamiento dependiendo las características y uso que tenga esta agua. Por otro lado, la salmuera puede ser vuelta al lugar donde se realizó la toma de agua o puede ser recuperado para su valorización. (Vicuña et al., 2022). En la figura 7, se muestra el proceso esquemático de una planta de desalinización.

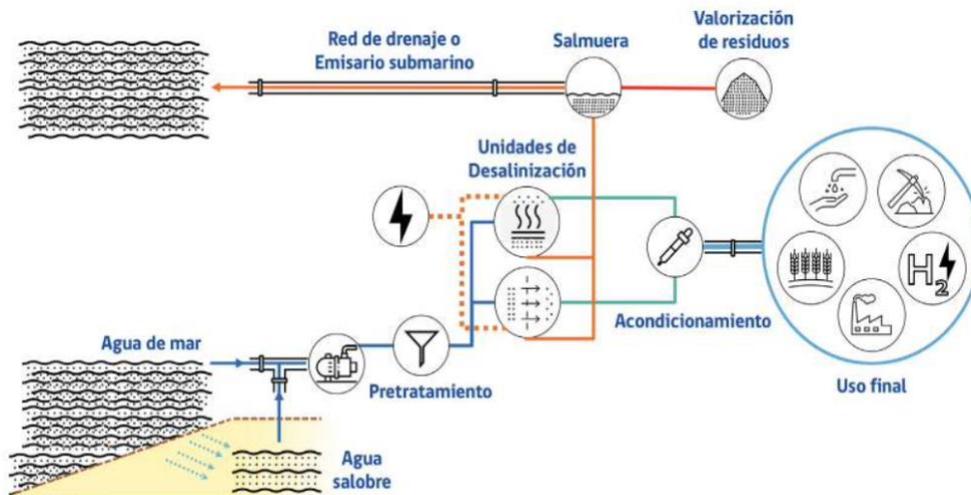


Figura 7. Esquema conceptual de las etapas para el proceso desalinización.  
Fuente: Vicuña et al., 2022.

## 8.4 Esquema de un electrolizador alcalino

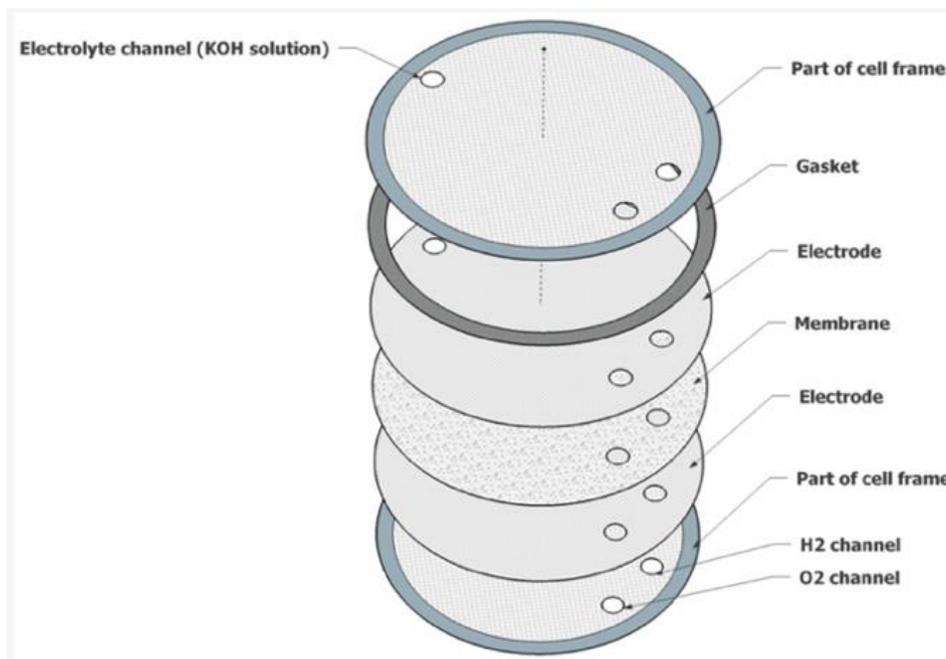


Figura 8. Esquema de la piezas que conforman a un electrolizador alcalino.  
Fuente: Koj et al., 2017.

## 8.5 Estandarización inventario energía eólica para unidad 1 MW

Para estandarizar los inventarios de energía eólica proporcionados por Nagashima et al. (2017) y Wang et al. (2019), simplemente se divide por la capacidad nominal del aerogenerador en estudio. Esto corresponde a una capacidad nominal de 1,65 MW y 2 MW, respectivamente.

En el caso del inventario suministrado por la empresa Vestas, que se basa en una planta eólica de 100 MW con turbinas de 6 MW, primero se divide el inventario por el número de aerogeneradores que constituye la planta, que son 17. Luego, se divide por la capacidad nominal de cada aerogenerador, que es de 6 MW.

## 8.6 Estandarización inventario electrolizador alcalino para unidad 1 kg hidrógeno producido

Para estandarizar los inventarios de Koj et al. (2017) y Kolahchian et al. (2023), es necesario dividir los inventarios por la producción de hidrógeno que el electrolizador generara a lo largo de su vida útil. Para esto, se requiere información sobre de la capacidad del electrolizador, su vida útil y la energía requerida para producir 1 kg de hidrógeno.

En el caso del inventario de Koj et al. (2017), se tiene un electrolizador de 6 MW con una vida útil de 20 años, capaz de operar durante 8.300 horas al año, y requiere de 49,9 kWh para producir 1 kg de hidrógeno. Por lo tanto, la producción de hidrógeno a lo largo de su vida útil se calcula de la siguiente manera:

$$6 \text{ MW} \cdot \frac{1000 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} \cdot \frac{8.300 \text{ hrs}}{\text{año}} \cdot 20 \text{ años} \cdot \frac{1 \text{ kg H}_2}{49,9 \text{ kWh}} = 2 \times 10^7 \text{ kg H}_2$$

Para el inventario de Kolahchian et al. (2023), se presenta un electrolizador de 6 MW con una vida útil de 80.000 horas, que requiere de 50,3 kWh para producir 1 kg de hidrógeno. Por lo tanto, para la producción de hidrógeno a lo largo de su vida útil se calcula de la siguiente manera:

$$6 \text{ MW} \cdot \frac{1000 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} \cdot 80.000 \text{ hrs} \cdot \frac{1 \text{ kg H}_2}{50,3 \text{ kWh}} = 9,5 \times 10^6 \text{ kg H}_2$$

## 8.7 Parametrización del inventario del aerogenerador en base kWh

Para parametrizar el inventario del aerogenerador en base a kWh, utilizando los datos promedios proporcionados en la tabla mencionada en el ítem 5.2, primero es necesario multiplicar los inventarios de acero y concreto por la potencia de la turbina, que en ese caso es de 2 MW. Luego, se divide por la producción total de energía que es de  $1,44 \times 10^8$  kWh.

Para el material de acero, el cálculo sería el siguiente:

$$\frac{1,3 \times 10^5 \text{ kg acero}}{1 \text{ MW}} \cdot \frac{2 \text{ MW}}{1,44 \times 10^8 \text{ kWh}} = \frac{1,8 \times 10^{-3} \text{ kg acero}}{\text{kWh}}$$

Y para el concreto:

$$\frac{4,2 \times 10^5 \text{ kg concreto}}{1 \text{ MW}} \cdot \frac{2 \text{ MW}}{1,44 \times 10^8 \text{ kWh}} = \frac{5,8 \times 10^{-3} \text{ kg concreto}}{\text{kWh}}$$

## 8.8 Parametrización del inventario del aerogenerador en base 1 kg hidrógeno producido

Para parametrizar el inventario del aerogenerador en base 1 kg hidrógeno producido, se utilizaron los resultados obtenidos en el anexo 8.7 para los materiales de acero y concreto. En el caso de la osmosis inversa, primero fue necesario multiplicar por la cantidad de energía necesaria para producir 1 m<sup>3</sup> de agua desalinizada o desalada que corresponde a 4,3 kWh, además de la cantidad de agua desalinizada requerida por el electrolizador para producir 1 kg de hidrógeno, que es de 10 kg de agua desalinizada. Estos datos se obtienen de los inventarios de producción de agua por ósmosis inversa e inventario de un electrolizador alcalino, respectivamente, mencionados en el ítem 5.2. Por último, para conversión de unidades, se necesita la densidad del agua, que se considera 1000 kg/m<sup>3</sup>. Por lo tanto el cálculo para el acero sería el siguiente:

$$\frac{1,8 \times 10^{-3} \text{ kg acero}}{\text{kWh}} \cdot \frac{4,3 \text{ kWh}}{1 \text{ m}^3 \text{ agua desalada}} \cdot \frac{10 \text{ kg agua desalada}}{1 \text{ kg H}_2} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ agua desalada}}{1000 \text{ kg agua desalada}} = \frac{7,6 \times 10^{-5} \text{ kg acero}}{1 \text{ kg H}_2}$$

Y para el concreto:

$$\frac{5,8 \times 10^{-3} \text{ kg concreto}}{\text{kWh}} \cdot \frac{4,3 \text{ kWh}}{1 \text{ m}^3 \text{ agua desalada}} \cdot \frac{10 \text{ kg agua desalada}}{1 \text{ kg H}_2} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ agua desalada}}{1000 \text{ kg agua desalada}} = \frac{2,5 \times 10^{-4} \text{ kg concreto}}{1 \text{ kg H}_2}$$

En el caso del electrolizador, se utiliza la cantidad de energía necesaria para producir 1 kg de hidrógeno, la cual corresponde a 49 kWh, este dato se obtiene del inventario de un electrolizador alcalino mencionado en el ítem 5.2. Así, el cálculo para el acero es el siguiente:

$$\frac{1,8 \times 10^{-3} \text{ kg acero}}{\text{kWh}} \cdot \frac{49 \text{ kWh}}{1 \text{ kg H}_2} = \frac{8,7 \times 10^{-2} \text{ kg acero}}{1 \text{ kg H}_2}$$

Y para el concreto :

$$\frac{5,8 \times 10^{-3} \text{ kg concreto}}{\text{kWh}} \cdot \frac{49 \text{ kWh}}{1 \text{ kg H}_2} = \frac{5,8 \times 10^{-2} \text{ kg concreto}}{1 \text{ kg H}_2}$$

## 8.9 Parametrización del inventario de la osmosis inversa en base 1 kg de hidrógeno producido

Para parametrizar la cantidad de agua de mar requerida, se utiliza la cantidad de agua de mar necesaria para producir 1 m<sup>3</sup> de agua desalinizada o desalada, que corresponde a 2,7 m<sup>3</sup> de agua de mar además, de la cantidad de agua de desalinizada que requiere el electrolizador para producir 1 kg de hidrógeno, la cual corresponde a 10 kg de agua desalinizada. Estos datos se obtienen de los inventarios de producción de agua por ósmosis inversa e inventario de un electrolizador alcalino, respectivamente, mencionados en el ítem 5.2. Por último, para conversión de unidades, se necesita la densidad del agua, que se considera 1000 kg/m<sup>3</sup>. Así la cantidad de agua de mar requerida para producir 1 kg de hidrógeno es la siguiente:

$$\frac{2,7 \text{ m}^3 \text{ agua mar}}{1 \text{ m}^3 \text{ agua desalada}} \cdot \frac{10 \text{ kg agua desalada}}{1 \text{ kg H}_2} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ agua desalada}}{1000 \text{ kg agua desalada}} = \frac{2,7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ agua mar}}{1 \text{ kg H}_2}$$

## 8.10 Parametrización del transporte de materiales en base 1 kg de hidrógeno producido

Para parametrizar el transporte de materiales utilizados para el aerogenerador, primero se necesitan las toneladas transportadas de materiales por kWh, calculadas en el anexo 8.7 y la distancia recorrida, que es de 500 km. El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\left( \frac{1,8 \times 10^{-3} \text{ kg acero}}{\text{kWh}} + \frac{5,8 \times 10^{-3} \text{ kg concreto}}{\text{kWh}} \right) \cdot 500 \text{ km} \cdot \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} = \frac{3,8 \times 10^{-3} \text{ tkm}}{\text{kWh}}$$

Luego, para parametrizarlo en base a 1 kg de hidrógeno producido, se debe considerar la dos casos, uno con la energía requerida para la ósmosis inversa y otro con la electricidad requerida por el electrolizador.

Para la ósmosis inversa, primero se multiplica la cantidad de energía necesaria para producir 1 m<sup>3</sup> de agua desalinizada o desalada que corresponde a 4,3 kWh, además de la cantidad de agua desalinizada necesaria por el electrolizador para producir 1 kg de hidrógeno, que es de 10 kg de agua desalinizada. Estos datos provienen de los inventarios mencionados en el ítem 5.2. Por último, para conversión de unidades, se necesita la densidad del agua, que se considera 1000 kg/m<sup>3</sup>, el cálculo es el siguiente:

$$\frac{3,8 \times 10^{-3} \text{ tkm}}{\text{kWh}} \cdot \frac{4,3 \text{ kWh}}{1 \text{ m}^3 \text{ agua desalada}} \cdot \frac{10 \text{ kg agua desalada}}{1 \text{ kg H}_2} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ agua desalada}}{1000 \text{ kg agua desalada}} = \frac{1,6 \times 10^{-4} \text{ tkm}}{1 \text{ kg H}_2}$$

Para el caso de la energía requerida por el electrolizador en base a 1 kg de hidrógeno producido, se multiplica por la cantidad de energía requerida para producir 1 kg de hidrógeno, que corresponde a 49 kWh. Los datos del electrolizador se obtuvieron del inventario mencionado en el ítem 5.2:

$$\frac{3,8 \times 10^{-3} \text{ tkm}}{\text{kWh}} \cdot \frac{49 \text{ kWh}}{1 \text{ kg H}_2} = \frac{1,9 \times 10^{-1} \text{ tkm}}{1 \text{ kg H}_2}$$

Finalmente, para parametrizar el transporte de materiales utilizados para la construcción del electrolizador, se utiliza los datos de acero, níquel y cobre proporcionados en el inventario del electrolizador mencionado en el ítem 5.2, junto con la distancia de 500 km. Así, se realiza el siguiente calculo:

$$\left( \frac{1,6 \times 10^{-2} \text{ kg acero}}{\text{kg H}_2} + \frac{1,5 \times 10^{-3} \text{ kg níquel}}{\text{kg H}_2} + \frac{1,6 \times 10^{-4} \text{ cobre}}{\text{kg H}_2} \right) \cdot 500 \text{ km} \cdot \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} = \frac{9 \times 10^{-3} \text{ tkm}}{\text{kg H}_2}$$

## 8.11 Matriz energética chilena para el año 2022

**Tabla 19. Matriz energética chilena para el año 2022.**  
Fuente: Generadoras de Chile, 2023.

Tipo de energía	Porcentaje de contribución
Geotérmica	0,6%
Termoeléctrica a carbón	23,2%
Hidroeléctrica	24,4%
Gas natural	19,1%
Petróleo	2,2%
Eólica	10,7%
Biomasa	2,3%
Solar	17,4%

## 8.12 Calculo producción global promedio de un aerogenerador

Para calcular la producción global promedio de un aerogenerador se considera que este tiene una potencial nominal de 2 MW, tiene un factor de planta de 33% es decir, que es capaz de producir energía eléctrica por 8 horas diarias. Por lo tanto, considerando lo anterior y contando con una vida útil de 20 años, se tiene el siguiente calculo:

$$2 \text{ MW} \cdot \frac{1000 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} \cdot \frac{8 \text{ hrs}}{\text{día}} \cdot \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \cdot 20 \text{ años} = 1.2 \times 10^8 \text{ kWh}$$

### 8.13 Impactos ambientales intermedios para ubicación en Punta Arenas

Para estimar los impactos ambientales intermedios, primero es necesario calcular el inventario global del sistema. Para ello, se utiliza la misma metodología mencionada en el ítem 4.4, con la única diferencia que se cambia el punto de parametrización del aerogenerador de MW a kWh. En este caso, se debe utilizar la energía anual para el caso de Punta Arenas, esta información se presenta en la tabla 17.

**Tabla 20. Impactos ambientales intermedios para la producción de 1 kg de hidrógeno para caso Puntas Arenas.**

Fuente: Elaboración Propia

Parámetros	Unidad	Upstream	Core	Total
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub>	1,9x10 <sup>-4</sup>	2,7x10 <sup>-1</sup>	2,7x10 <sup>-1</sup>
Agotamiento capa de Ozono	Kg CFC-11	6,6x10 <sup>-12</sup>	8,7x10 <sup>-9</sup>	8,7x10 <sup>-9</sup>
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub>	6,0x10 <sup>-7</sup>	8,2x10 <sup>-4</sup>	8,2x10 <sup>-4</sup>
Eutroficación agua dulce	kg PO <sub>4</sub>	3,4x10 <sup>-7</sup>	4,8x10 <sup>-4</sup>	4,8x10 <sup>-4</sup>
Eutroficación marina	Kg N	1,5x10 <sup>-7</sup>	2,1x10 <sup>-4</sup>	2,1x10 <sup>-4</sup>
Agotamiento recursos fósiles	kg petróleo eq	3,7x10 <sup>-5</sup>	5,2x10 <sup>-2</sup>	5,2x10 <sup>-2</sup>
Consumo de agua	m <sup>3</sup>	2,7x10 <sup>-2</sup>	5,8x10 <sup>-2</sup>	8,5x10 <sup>-2</sup>

### 8.14 Impactos ambientales intermedios para producción global promedio generación energía eólica

Para estimar los impactos ambientales intermedios, primero es necesario calcular el inventario global del sistema. Para ello, se utiliza la misma metodología mencionada en el ítem 4.4, con la única diferencia que se cambia el punto de parametrización del aerogenerador de MW a kWh. En este caso, se utiliza la energía anual para el caso de producción de global promedio, esta información se presenta en la tabla 17.

**Tabla 21. Impactos ambientales intermedios para la producción de 1 kg de hidrógeno para caso producción global promedio.**

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros	Unidad	Upstream	Core	Total
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub>	3,0x10 <sup>-4</sup>	3,9x10 <sup>-1</sup>	3,9x10 <sup>-1</sup>
Agotamiento capa de Ozono	Kg CFC-11	1,0x10 <sup>-11</sup>	1,3x10 <sup>-8</sup>	1,3x10 <sup>-8</sup>
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub>	9,3x10 <sup>-7</sup>	1,2x10 <sup>-3</sup>	1,2x10 <sup>-3</sup>
Eutroficación agua dulce	kg PO <sub>4</sub>	5,2x10 <sup>-7</sup>	6,9x10 <sup>-4</sup>	6,9x10 <sup>-4</sup>
Eutroficación marina	Kg N	2,3x10 <sup>-7</sup>	3,1x10 <sup>-4</sup>	3,1x10 <sup>-4</sup>
Agotamiento recursos fósiles	Kg petróleo eq	5,8x10 <sup>-5</sup>	7,5x10 <sup>-2</sup>	7,5x10 <sup>-2</sup>
Consumo de agua	m <sup>3</sup>	2,7x10 <sup>-2</sup>	8,3x10 <sup>-2</sup>	1,1x10 <sup>-1</sup>

