



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

**HIDRÓGENO VERDE Y BATERÍAS DE LITIO COMO ALTERNATIVA DE
ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO EN PLANTAS FOTOVOLTAICAS:
EVALUACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

LJUVANA NEVENKA KOSCINA MONTECINOS

PROFESOR GUÍA:
Felipe Díaz Alvarado

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Jorge Miranda Bernal
Francisco Gracia Caroca

SANTIAGO DE CHILE
2022

HIDRÓGENO VERDE Y BATERÍAS DE LITIO COMO ALTERNATIVA DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO EN PLANTAS FOTOVOLTAICAS: EVALUACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El abastecimiento de energía eléctrica con fuentes renovables ha tomado un papel importante en los últimos años, Chile tiene metas de largo plazo donde establece que al menos el 70 % de la energía eléctrica generada anualmente provenga de fuentes renovables no convencionales al año 2050. Para cumplir este propósito, es importante complementar la entrada de energías renovables no convencionales junto con sistemas de almacenamiento que permiten reducir la variabilidad climática y horaria. Sin embargo, estos sistemas de almacenamiento difieren en su impacto ambiental.

En este contexto, el presente estudio tiene por objetivo evaluar y comparar ambientalmente las principales tecnologías de almacenamiento en discusión en el contexto de sistemas solares de generación eléctrica en Chile. Se realiza un Análisis de Ciclo de Vida de dos sistemas de almacenamiento energético para plantas fotovoltaicas: sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* y sistema de baterías ion-Litio. Se evalúa mediante dos categorías de impacto ambiental: Potencial de Calentamiento Global y Agotamiento de Recursos Minerales. La unidad funcional para evaluar ambos sistemas, corresponde al suministro de 1[MW] de potencia ininterrumpida durante 24 [h] en un horizonte temporal de 25 años.

En la categoría de Potencial de Calentamiento Global, se obtienen resultados con una diferencia de un 3,94 %, donde el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* presenta una emisión de gases GEI menor que el sistema Baterías ion-Litio, se considera que los resultados obtenidos no son concluyentes dado que la diferencia es poco significativa y los resultados están sujetos a un margen de error. En cuanto a la categoría de impacto Agotamiento de Recursos Minerales, se obtiene una diferencia significativa con un impacto de un 41,2% mayor para el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*. La justificación se basa en la menor eficiencia del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* que conlleva a un requerimiento mayor de paneles fotovoltaicos. Por otra parte, se realiza un análisis de sensibilidad con el objetivo de identificar el potencial de disminución de impacto en función de los puntos de mejora de los dos sistemas de almacenamiento. En el caso del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*, este requiere duplicar su eficiencia para igualar el impacto del Agotamiento de Recursos Minerales del sistema de Baterías ion-Litio. En el caso del sistema de Baterías ion-Litio, el punto de mejora corresponde a aumentar la cantidad de ciclos de descarga de las baterías, para aumentar su vida útil. Se obtiene que al aumentar el número de ciclos el resultado de Agotamiento de Recursos Minerales disminuye entre 4 % y 8 %.

Se concluye que el sistema de Baterías ion-Litio se encuentra en un mejor nivel de desempeño en base a los resultados de las categorías de impacto ambiental. La razón es que posee un mayor potencial de disminución de impacto en el tiempo, dado que actualmente se proyecta a corto plazo un aumento significativo de la cantidad de ciclos de descarga de las Baterías ion-Litio. No así el aumento de eficiencia del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*, ya que implica un desafío tecnológico que logre duplicar la eficiencia del sistema en el corto plazo.

A mi nono.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco profundamente a mi familia por estar siempre ahí para mí, apoyándome, amándome, guiándome. Gracias por todas las oportunidades que me han entregado, por todos los esfuerzos que han realizado por mí, por hacerme sentir que son mi lugar seguro, por hacer que la distancia no sea nada porque siempre los siento cerca. Agradezco cada segundo que los tengo a mi lado, son mi vida entera y los amo infinitamente a cada uno. Agradezco a mi hermano Zdenko y a mi cuñada Nicole por acogerme en su casa durante todos los años de estudio.

A las niñas, mis amigas de la vida, por estar presente siempre en las buenas y en las malas, agradezco haber crecido junto a ustedes. A pesar de la distancia, las tengo siempre presente, en un recuerdo, en una canción, sé que nuestra amistad no tiene fecha de vencimiento y estaremos apoyándonos por mucho tiempo más.

A mis amigos de la U, por hacer este camino mucho más bonito, por todas las horas de estudio juntos, por todo el apañe y los momentos bacanes que recordaré siempre con mucho cariño. Agradezco especialmente a la Lula, Pipe y Rorro por todas las conversas de horas, por todo el apoyo que nos dimos, por estar siempre desde primer año hasta el final.

Rorro, definitivamente la universidad no hubiese sido lo mismo sin ti. Agradezco a las coincidencias de la vida que nos permitieron conocernos, estoy segura que si el multiverso existe, somos amigos en cada una de nuestras versiones.

Agradezco a Joaquín, por enseñarme tanto, por siempre motivarme a ser mi mejor versión, por todo el amor que me entregas, por la paciencia, porque le ponemos empeño para seguir creciendo. Espero que podamos seguir cumpliendo muchas metas juntos, las tuyas, las mías y las nuestras. Agradezco también a su familia que me acogió como una más y se volvió mi segunda familia.

A mi profe Felipe Díaz, por todos los aprendizajes adquiridos, por su vocación por la docencia, por siempre creer en mis capacidades, por darme comprensión y facilidades en momentos difíciles.

Agradezco a Jorge Miranda por las enseñanzas, por su sinceridad y por sus preguntas que me ayudaban a mejorar mi trabajo.

A Cyclo por el crecimiento y experiencia que adquirí y por la buena onda.

A mi misma, por demostrarme que sí puedo y por creer en mí.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Energías Renovables No Convencionales	1
1.2. Tecnologías de Almacenamiento	3
1.2.1. Objetivos	5
1.2.1.1. Objetivo General	5
1.2.1.2. Objetivos Específicos	5
1.2.2. Motivación	5
2. Marco Teórico	7
2.1. Baterías ion-Litio	7
2.2. Hidrógeno Verde <i>Fuel Cell</i>	9
2.2.1. Electrólisis	10
2.2.2. Almacenamiento	11
2.2.3. <i>Fuel Cell</i>	12
3. Metodología	14
3.1. Análisis de Ciclo de Vida	14
3.1.1. Objetivos y Alcances	14
3.1.2. Análisis de Inventario	15
3.1.3. Evaluación de Impacto Ambiental	15
3.1.4. Interpretación	16
4. Estado del Arte:	
Análisis de Ciclo de Vida de tecnologías de almacenamiento energético.	18
4.1. ACV de un sistema de suministro de energía ininterrumpida a base de hidrógeno que utiliza energía renovable.	18
4.2. ACV de procesos de producción de baterías	19
4.3. ACV comparativo de bicicletas eléctricas impulsadas por baterías de litio y Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	19
5. Objetivos y Alcances del Análisis de Ciclo de Vida	20
5.1. Objetivos del Análisis de Ciclo de Vida	20
5.2. Alcance del estudio	21
5.2.1. Casos de estudio	21
5.2.1.1. Planta Fotovoltaica	21
5.2.1.2. Sistema de Baterías ion-Litio	23
5.2.1.3. Sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	23
5.2.2. Unidad Funcional	25

5.2.3.	Límites del sistema	25
5.2.4.	Calidad de los datos	26
5.2.5.	Categorías de impacto	26
5.2.5.1.	Potencial de Calentamiento Global	26
5.2.5.2.	Agotamiento de Recursos Minerales	26
6.	Análisis de Inventario	28
6.1.	Balance de masa y energía	28
6.1.1.	Hidrógeno Verde <i>Fuel Cell</i>	28
6.1.1.1.	Balance de Masa	28
6.1.1.2.	Balance de Energía	32
6.1.2.	Baterías de ion-Litio	36
6.1.2.1.	Balance de Masa	36
6.1.2.2.	Balance de Energía	36
6.2.	Cálculo de área de paneles solares	38
6.3.	Datos del sistema	39
6.3.1.	Hidrógeno Verde <i>Fuel Cell</i>	39
6.3.1.1.	Instalación	39
6.3.1.2.	Mantenimiento	43
6.3.1.3.	Desmantelamiento	44
6.3.2.	Baterías ion-Litio	45
6.3.2.1.	Instalación	45
6.3.2.2.	Mantenimiento	46
6.3.2.3.	Desmantelamiento	47
7.	Evaluación de Potencial de Calentamiento Global	48
7.1.	Factores de emisión	48
7.2.	Cuantificación de Impacto	50
7.3.	Análisis de Sensibilidad	54
7.4.	Discusión	55
8.	Evaluación de Agotamiento de Recursos Minerales	57
8.1.	Factores de caracterización	57
8.2.	Cuantificación de impacto	59
8.3.	Análisis de Sensibilidad	62
8.4.	Discusión	64
9.	Conclusiones	67
	Bibliografía	69
A.	Balance de masa y energía	75
A.1.	Hidrógeno Verde - <i>Fuel Cell</i>	75
B.	Datos del sistema	78
B.1.	Cálculo de paneles solares	78
B.2.	Planta Fotovoltaica	78
B.3.	Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	79

B.4. Baterías ion-Litio	82
C. Factores de emisión	83
D. Cuantificación de impacto	84
D.1. Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	84
D.2. Baterías ion-Litio	86

Índice de Tablas

5.1.	Parámetros principales del sistema de baterías.	23
5.2.	Factores de potencial de calentamiento global a 100 años [41].	27
6.1.	Resultados principales del balance de masa del sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	32
6.2.	Resultados principales del balance de energía del sistema Hidrógeno- <i>Fuel Cell</i>	35
6.3.	Resultados principales del balance energético del sistema de baterías ion-Litio.	37
6.4.	Resultados del modelo de generación fotovoltaica para el caso de estudio del sistema de baterías de baterías ion-Litio.	39
6.5.	Resultados del modelo de generación fotovoltaica para el caso de estudio del sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	39
6.6.	Datos de inventario de paneles solares para el sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> en la etapa de instalación.	40
6.7.	Datos de inventario del inversor y el transformador para el sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	40
6.8.	Datos de inventario del electrolizador alcalino para el sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	41
6.9.	Datos de inventario del equipo <i>Fuel Cell</i> SOFC para el sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	41
6.10.	Datos de inventario de los Tanque de Almacenamiento del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	42
6.11.	Datos de inventario de los equipos secundarios del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	43
6.12.	Datos de inventario transporte de importación equipos de sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	43
6.13.	Datos de inventario de mantención de equipos secundarios del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	44
6.14.	Datos de inventario de mantención de los equipos electroquímicos el sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	44
6.15.	Datos de inventario de paneles solares para el sistema de baterías ion-Litio en la etapa de instalación.	45
6.16.	Datos de inventario de inversor y transformador para el sistema de baterías ion-Litio en la etapa de instalación.	45
6.17.	Datos de inventario de baterías de ion-Litio para la etapa de instalación.	46
6.18.	Datos de inventario transporte de importación equipos de sistema Baterías ion-Litio.	46
6.19.	Datos de vida útil y el número de reemplazo de baterías ion-Litio en etapa de mantención.	47
7.1.	Factores de emisión de la fabricación de equipos recopilados de la base de datos <i>Ecoinvent</i> -	49

7.2.	Factor de emisión de potencial de calentamiento global para el transporte marítimo en buque de carga	50
7.3.	Factor de emisión utilizado para el fin de vida de los equipos en la etapa de desmantelamiento.	50
8.1.	Factores de caracterización de la fabricación de equipos recopilados de la base de datos <i>Ecoinvent</i>	57
8.2.	Factor de caracterización utilizado para el fin de vida de los equipos en la etapa de desmantelamiento.	58
A.1.	Parámetros utilizados en el balance energético del sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	75
A.2.	Resultados del balance de masa del sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	76
A.3.	Resultados del balance energético del sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	76
A.4.	Datos termodinámicos de cada flujo del sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	77
B.1.	Parámetros estándar del modelo de generación fotovoltaica.	78
B.2.	Datos inventario de paneles solares.	78
B.3.	Datos de inventario para el inversor y transformador.	79
B.4.	Datos de inventario del electrolizador alcalino.	79
B.5.	Datos de inventario del equipo <i>Fuel Cell</i> en la etapa de instalación.	80
B.6.	Parámetros para el cálculo de volumen del tanque de almacenamiento de Oxígeno mediante gases ideales.	81
B.7.	Cálculo de número de Tanques de almacenamiento para el sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	81
B.8.	Datos de inventario de los equipos secundarios del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	82
B.9.	Datos de inventario de baterías ion-Litio.	82
C.1.	Estimación del factor de emisión del material litio ferrofosfato.	83
D.1.	Resultados por macro etapa del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	84
D.2.	Resultados por etapa del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> en la macro etapa de Instalación	85
D.3.	Resultados por etapa del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> en la macro etapa de Mantenimiento	85
D.4.	Resultados por etapa del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> en la macro etapa de Desmantelamiento.	85
D.5.	Resultados por macro etapa del sistema Baterías ion-Litio.	86
D.6.	Resultados de macro etapa Instalación para el sistema Baterías ion-Litio.	86
D.7.	Resultados de macro etapa Mantenimiento para el sistema de Baterías ion-Litio.	86
D.8.	Resultados de macro etapa Desmantelamiento para sistema de Baterías ion-Litio.	87

Índice de Figuras

1.1.	Matriz de Generación Eléctrica de Chile en el año 2020 [3].	2
1.2.	Proyección de la Matriz de Generación Eléctrica de Chile en para el año 2050 [3].	2
2.1.	Diagrama proceso de descarga de batería ion-Litio LFP, figura adaptada [16]. .	9
2.2.	Diagrama del funcionamiento de un electrolizador alcalino, figura adaptada [22].	11
2.3.	Diagrama del funcionamiento de una <i>Fuel Cell</i> óxido sólido, figura adaptada [26].	13
3.1.	Marco de referencia de un Análisis de Ciclo de Vida. Adaptado de [28].	14
3.2.	Esquema categorías de impacto para Análisis de Ciclo de Vida. Figura adaptada de [30].	16
5.1.	Radiación solar por comuna en la Región de Atacama. [36]	22
5.2.	Diagrama de flujo del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i>	24
5.3.	Diagrama de las macro etapa de los límites del sistema de estudio.	25
7.1.	Comparación de resultados globales de Potencial de Calentamiento Global del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> y el sistema de Baterías ion-Litio.	50
7.2.	Comparación de resultados de Potencial de Calentamiento Global por etapa de ciclo de vida del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> y el sistema de Baterías ion-Litio.	51
7.3.	Distribución de emisiones de Potencial de Calentamiento Global en la etapa de Instalación del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> y el sistema de Baterías ion-Litio.	52
7.4.	Distribución de emisiones de Potencial de Calentamiento Global en la etapa de Mantenición del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> y el sistema de Baterías ion-Litio.	53
7.5.	Análisis de sensibilidad sobre el Potencial de Calentamiento Global en el sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> en función de la eficiencia del sistema.	54
7.6.	Análisis de sensibilidad sobre el Potencial de Calentamiento Global en el sistema de Baterías de ion-Litio en función del número de ciclos de descarga.	55
8.1.	Comparación de resultados globales de Agotamiento de Recursos Minerales del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> y el sistema de Baterías ion-Litio.	59
8.2.	Comparación de resultados de Agotamiento de Recursos Minerales por etapa de ciclo de vida del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> y el sistema de Baterías ion-Litio.	60
8.3.	Comparación de resultados de Agotamiento de Recursos Minerales en la macroetapa Instalación del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> y el sistema de Baterías ion-Litio.	61
8.4.	Distribución de emisiones de Agotamiento de Recursos Minerales en la etapa de Mantenición del sistema Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> y el sistema de Baterías ion-Litio.	62
8.5.	Análisis de sensibilidad sobre el Agotamiento de Recursos Minerales en el sistema de Hidrógeno <i>Fuel Cell</i> en función de la eficiencia del sistema.	63
8.6.	Análisis de sensibilidad sobre el Agotamiento de Recursos Minerales en el sistema de Baterías ion-Litio en función del número de ciclos de descarga.	64

Capítulo 1

Introducción

1.1. Energías Renovables No Convencionales

El mundo se encuentra en una situación crítica en lo que respecta a la crisis climática y ambiental, donde se ha comprobado que no es sostenible seguir con el desarrollo de la sociedad desde una mirada antropocentrista como se ha realizado desde la Revolución Industrial. A partir de esto, surge la necesidad de cambiar la forma en que producimos y nos desarrollamos de manera que pueda ser más sustentable en el tiempo. Una de las bases del desarrollo y de los procesos productivos es el abastecimiento de energía, sin embargo la mayor parte de la generación energética mundial se basa en la utilización de combustibles fósiles, lo cual trae dos problemáticas climáticas importantes: el agotamiento de recursos fósiles y el daño generado a través del calentamiento global, producto de la excesiva emisión de CO_2 a la atmósfera en comparación con niveles preindustriales.

En base a lo mencionado, los países han ido implementando cambios en su matriz energética, con el objetivo de intensificar la participación de energías renovables no convencionales como la eólica, solar fotovoltaica, biomasa, pequeñas centrales hidroeléctricas, mareomotriz, la geotérmica, entre otras. Estas fuentes de generación de energía eléctrica son consideradas limpias porque su nivel de emisiones de gases efecto invernadero son bajos en comparación a las tecnologías termoeléctricas basadas en combustibles fósiles, además son llamadas no convencionales porque tienen un uso menos masivo o están en proceso de desarrollo tanto tecnológico como industrial, por lo que aún poseen una desventaja económica en comparación a las alternativas convencionales [1].

Chile es un país con el potencial climático para mejorar las prácticas energéticas y ser parte de una producción más limpia, debido a la alta radiación solar que se presenta en la zona norte y los fuertes vientos que surgen en el sur[2]. En el año 2015 nace la política Energía 2050, que surge como respuesta a la motivación de orientar un futuro energético sustentable y diversificado en el país. Entre las metas de largo plazo establecidas en la hoja de ruta, se destaca que al menos el 70 % de la energía eléctrica generada anualmente provenga de fuentes renovables no convencionales al año 2050 y con ello reducir las emisiones de GEI en al menos un 30 %.

Con respecto a la matriz de generación de energía eléctrica actual en Chile (Figura 1.1), se tiene que el 51% de las fuentes energéticas corresponden a energías renovables, donde el 13% corresponde a energía solar y el 10% a energía eólica[3].

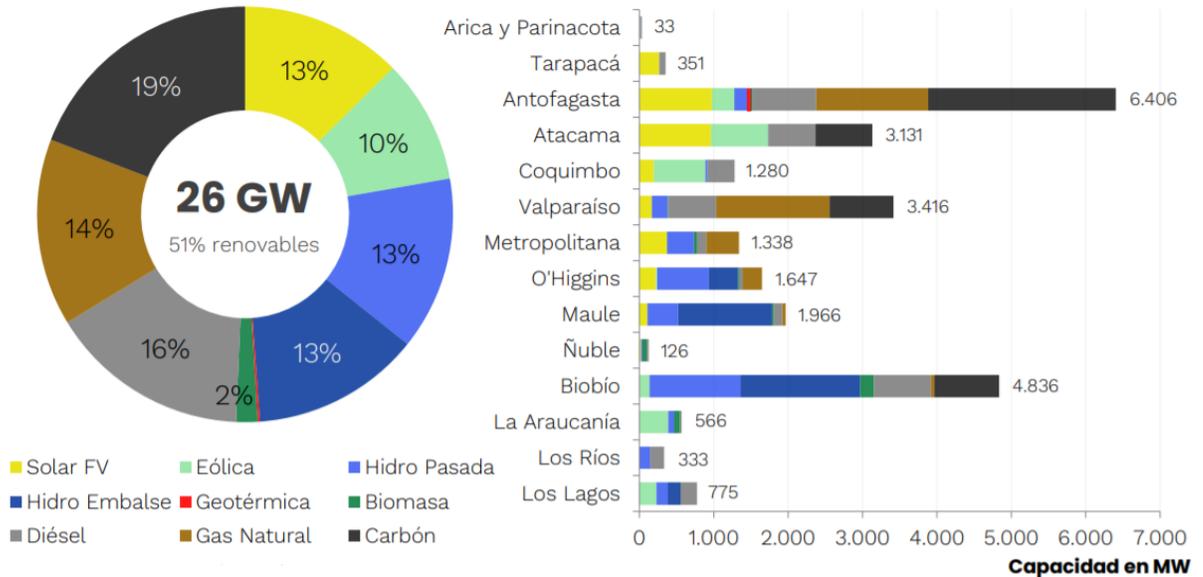


Figura 1.1: Matriz de Generación Eléctrica de Chile en el año 2020 [3].

En la Planificación Energética a Largo Plazo de Chile 2020 (PELP) se realiza una proyección de la matriz de generación de energía eléctrica para el año 2050 (Figura 1.2), donde se espera que el 85% de las fuentes energéticas correspondan a energías renovables, aumentando además el protagonismo de las energías renovables no convencionales como la eólica y la solar[3].

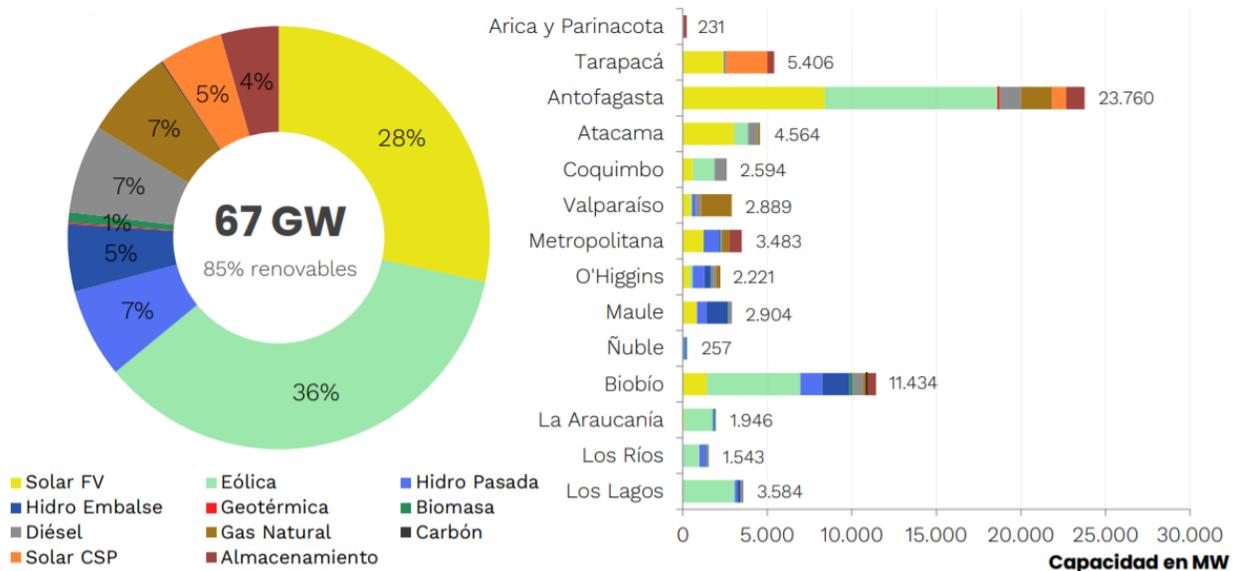


Figura 1.2: Proyección de la Matriz de Generación Eléctrica de Chile en para el año 2050 [3].

Sin embargo, existe una problemática en torno a las energías renovables no convencionales y es que estas producen energía de forma variable. Esto quiere decir que no producen un flujo constante de energía por lo que no igualan la demanda por electricidad todas las horas del año, son geográficamente dispersas y pueden mostrar fuertes fluctuaciones temporales. Estas características dificultan su integración en el sistema de suministro de energía existente en Chile[4].

Específicamente, la energía solar presenta variabilidad que depende de las condiciones climáticas. En verano la radiación solar es mayor que en invierno, por lo que durante esta época la generación eléctrica es mayor. También es afectada por la variabilidad horaria, ya que durante el día la radiación no es constante, existen horas del día donde se produce un mayor flujo de energía, mientras que en la noche la radiación solar baja drásticamente [5].

Este es uno de los principales motivos por lo que la matriz eléctrica necesita complementar la generación de energía con fuentes de energía convencionales, sin embargo existen tecnologías de almacenamiento energético que permiten amortiguar la variabilidad de esta fuente energética sin necesidad de utilizar otras fuentes de energía. El siguiente estudio está orientado a comparar alternativas de almacenamiento de energía en el contexto de generación eléctrica solar.

1.2. Tecnologías de Almacenamiento

Tradicionalmente el ser humano ha necesitado almacenar sus recursos energéticos para tiempos de escasez o para ser empleados cuando más convenga. Los combustibles fósiles, por su alta disponibilidad, transportabilidad y facilidad a la hora de ser almacenados y conservados han sido la solución escogida de forma mayoritaria hasta nuestros días, además poseen una alta densidad energética, esto quiere decir que una masa o volumen determinado logra almacenar más energía que otros fluidos energéticos. No obstante, existe una creciente penetración de generación de energía a partir de fuentes renovables y ajustar la oferta energética a la demanda se vuelve un desafío importante en este caso debido a la intermitencia de las ERNC causada generalmente por condiciones meteorológicas. Debido a esto es necesario el desarrollo de tecnologías que permitan almacenar y transportar la energía generada a partir de fuentes como el sol y el aire que, por su naturaleza, no son almacenables y transportable[6].

Las tecnologías de almacenamiento de energía se dividen en cuatro grandes grupos: mecánicas, térmicas, eléctricas y electroquímicas. Entre las tecnologías mecánicas más utilizadas se encuentran el almacenamiento por aire comprimido (CAES) el que funciona enviando aire comprimido a cavernas subterráneas, en las cuales posteriormente se introducen grandes cantidades de agua, provenientes de un reservorio en la superficie, para que la presión hidrostática fuerce el aire a la superficie y así accionar una turbina que genera electricidad[7].

El almacenamiento de energía térmica a calor latente se basa en la absorción o liberación de calor cuando un material almacenado sufre un cambio de fase reversible, como el cambio de estado líquido a gaseoso o sólido a líquido. Los almacenamientos por calor sensible acumulan energía en la variación de temperatura de un material, para luego depositarlo en un

contenedor aislado térmicamente[8].

En el ámbito de almacenamiento eléctrico, predomina el almacenamiento magnético de energía con superconductores. El principio en el que se fundamentan estos dispositivos es que al aplicar una diferencia de potencial entre dos conductores metálicos, separados por un material aislante se produce una acumulación de cargas de distinto signo en cada conductor, la energía entra al sistema accionando una bobina superconductora que forma un campo magnético para almacenarla[9].

Por otro lado, existen sistemas energéticos que unen equipos de almacenamiento mecánico con dispositivos de conversión electroquímica. El equipo de almacenamiento tiene la función de almacenar el combustible químico, generalmente consiste en tanques de almacenamiento. A su vez, el dispositivo de conversión tiene por objetivo transformar el combustible químico en energía.

El principio de funcionamiento de los dispositivos de conversión electroquímicos se fundamenta en la transformación de energía eléctrica en energía química mediante celdas electroquímicas, donde se almacena para posteriormente ser convertida en energía eléctrica. Se trata de una de las formas más antiguas de almacenamiento energético, consistente en reacciones químicas reversibles de oxidación y reducción (Redox) en presencia de un electrolito. Las reacciones de reducción consisten en la ganancia de electrones por parte de un componente químico, mientras que las de oxidación consisten en la pérdida de electrones por parte de este. Cada una de las celdas que componen estos sistemas de almacenamiento consta de un electrodo positivo (ánodo) y un electrodo negativo (cátodo), además del electrolito que puede estar en estado líquido, sólido o mixto[10].

Entre estos sistemas electroquímicos están las baterías, las cuales son comúnmente utilizadas en sistemas de almacenamiento conectados a redes de distribución o aisladas, dado que son dispositivos de fácil escalabilidad e interconexión, poseen atractivas características técnicas en capacidad de energía almacenable, potencia de carga/descarga para distintas aplicaciones y una buena densidad energética, además de ser equipos seguros bajo determinados cuidados [11]. Este estudio se centrará en las baterías ion-litio, sus características y funcionamiento se detallarán en el capítulo 2.

Otro dispositivo de conversión electroquímico son las celdas de combustibles, desde ahora en adelante *Fuel Cell*, dado que es el término más acertado a su funcionamiento, la traducción al español da a entender que lo principal es el combustible, sin embargo la clave de su funcionamiento está en la alimentación permanente. Las *Fuel Cell* producen energía a partir de suministros externos de combustible y una solución oxidante. Cuando la energía es requerida se consumen ambos componentes generando electricidad y una solución reductora, y cuando se necesita almacenar energía eléctrica el sistema utiliza la electricidad junto con el reductor para producir solución oxidante y combustible [12]. Este estudio se centrará en los sistemas de hidrógeno como almacenamiento eléctrico de origen solar, esta tecnología se detallará en el capítulo 2.

1.2.1. Objetivos

1.2.1.1. Objetivo General

Evaluar y comparar el impacto ambiental de tecnologías de almacenamiento energético basadas en hidrógeno verde y baterías de litio, en el contexto de la generación energética de una planta fotovoltaica, usando la herramienta Análisis de Ciclo de Vida.

1.2.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar las operaciones unitarias de los procesos de producción y almacenamiento energético.
- Definir el objetivo y alcances del Análisis de Ciclo de Vida, y en consecuencia definir los límites del sistema.
- Analizar el inventario de flujos másicos y energéticos para cada una de las tecnologías.
- Evaluar y comparar el impacto ambiental de las tecnologías mediante las categorías de impacto de Potencial de Calentamiento Global y Agotamiento de Recursos Abióticos.
- Comparar el impacto ambiental de ambas tecnologías e identificar puntos de mejora en el proceso de producción y almacenamiento energético.

1.2.2. Motivación

En base al contexto mencionado, considerando la proyección de Chile en cuanto a la integración de Energías Renovables No Convencionales en la matriz de generación eléctrica nacional, impulsando fuertemente la energía solar, surge la necesidad de trabajar con tecnologías de almacenamiento energético para lograr una integración estable a los sistemas de electricidad en Chile y así poder cubrir la demanda.

La elección de un sistema de almacenamiento es fundamental. Por un lado, las plantas solares de generación eléctrica obtendrían una mayor estabilidad en el suministro si consideran una alternativa de almacenamiento adecuada. Por otro lado, el cambio de las alternativas actuales puede reducir el impacto ambiental de las alternativas convencionales.

Actualmente, la tecnología mayormente utilizada para almacenar energía es la batería de plomo-ácido. No obstante, el plomo genera un gran impacto ambiental dado que es altamente tóxico y bioacumulable, provocando efectos nocivos en los organismos y medio ambiente. Es por esto que se propone evaluar el impacto ambiental de dos alternativas de almacenamiento energético para plantas fotovoltaicas; hidrógeno verde y baterías de litio.

Se escoge estas alternativas dado que poseen una gran capacidad energética y se han ido posicionando como una opción más sustentable en reemplazo de las baterías de plomo-ácido, ya que no poseen materiales que sean tóxicos o ácidos para el medio ambiente. Sin embargo, estas alternativas también poseen impactos ambientales asociados a su ciclo de vida, como por ejemplo los impactos generados por los gases de efecto invernadero emitidos en los procesos de extracción de minerales y en los procesos de producción de los equipos. Sumado a esto, la actividad extractiva en ambos casos genera un impacto asociado al agotamiento de minerales

debido a que no son ilimitados ni renovables. En base a lo anterior se escogen dos categorías de impacto a evaluar: Potencial de Calentamiento Global y Agotamiento de Recursos Minerales.

Hasta el momento no se ha realizado un análisis comparativo entre estas dos tecnologías en el contexto de suministro eléctrico continuo, por lo que se busca poder incorporar este tipo de conocimiento en las herramientas de apoyo a la toma de decisiones de actores del mercado energético, para que puedan comparar el impacto ambiental que conlleva la implementación y uso de nuevas soluciones.

El trabajo de título busca evaluar y comparar, mediante un análisis de ciclo de vida, dos alternativas de almacenamiento energético en el contexto de una planta fotovoltaica.

Capítulo 2

Marco Teórico

En el presente capítulo se detallan las características y funcionamiento de las tecnologías de almacenamiento que poseen mayor potencial a instalarse en Chile y se compararán ambientalmente en este estudio. En la sección 2.1 se detallan las características de las baterías ion-Litio y en la sección 2.2 se detallan las características del almacenamiento Hidrógeno *Fuel Cell*.

2.1. Baterías ion-Litio

Una batería es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química en energía eléctrica gracias a una reacción química de óxido-reducción, Las baterías se clasifican en dos tipos[11]:

- Baterías primaria: No está diseñada para ser recargada eléctricamente, dado que la reacción electroquímica no es reversible (solo permite la descarga).
- Batería secundaria: Es diseñada para ser recargada eléctricamente, de forma que la reacción electroquímica permita tanto la descarga como la carga (de energía química a eléctrica y viceversa, respectivamente).

Existen baterías con tecnologías más maduras que llevan más tiempo en el mercado como las de plomo-ácido, sin embargo se ha identificado que son perjudiciales al medio ambiente debido a la cantidad de dióxido de azufre que producen, además el plomo es un metal pesado tóxico dañino para los seres vivos[13].

Es por esto que se han ido desarrollando nuevas alternativas más limpias en cuanto a almacenamiento energético como las baterías de ion-litio. Sin embargo, estas baterías también presentan impactos ambientales asociados principalmente al proceso de producción. Uno de estos impactos son las emisiones de carbono atribuibles a la actividad extractiva del Litio, además al ser una materia prima de bajo costo no suele ser tan rentable reciclarlo por lo que se fomenta el agotamiento de recursos minerales[13].

Hoy en día, las baterías ion-Litio son una de las tecnologías que centra mayores esfuerzos en materia de investigación y desarrollo a nivel mundial. Sus grandes prestaciones, unidas a su gran variedad de aplicaciones, tanto estacionarias como móviles, la convierten en tecnología clave para abordar una transición energética hacia un modelo más sostenible.

El término ion-Litio no se refiere a una única pareja electroquímica, sino a un amplio abanico cuyo denominador común es el flujo de iones de litio entre los electrodos tanto para el proceso de carga como de descarga. Durante el proceso de carga los electrones del circuito externo fluyen del cátodo al ánodo, lo que induce a que los iones Li^+ se transporten desde el cátodo al ánodo. Típicamente, el litio viene incorporado en el cátodo junto a otros materiales, en forma de óxidos metálicos o fosfatos, para el ánodo se emplea comúnmente grafito y para el electrolito se utiliza un compuesto orgánico disuelto con sales iónicas, como por ejemplo Hexafluorofosfato de litio ($LiPF_6$) disuelto en etileno, dietilo o dimetilo[14].

La composición del cátodo afecta primordialmente al rendimiento y capacidad de la batería, entre composiciones de materiales de litio más utilizados en el cátodo están litio níquel-cobalto-óxido de manganeso ($NMC=LiNi_xCO_yMn_zO_2$), litio óxido de manganeso ($LMO=LiMn_2O_4$) y litio ferrofosfato ($LFP = LiFePO_4$), las baterías LMO y LFP son las más maduras en cuanto a tecnología y son las que poseen un menor impacto ambiental debido a que no contienen metales tóxicos o pesados[14]. Específicamente estas últimas, poseen un mayor rango de estado de carga ($SOC = Stage\ of\ charge$) y tienen un mayor número de ciclos de carga, lo que las hace conveniente para aplicaciones de almacenamiento conectadas a la red eléctrica dado que tienen un mayor tiempo de vida útil. Mientras que las baterías NMC son mejores candidatas en términos de densidad energética para aplicaciones de electromovilidad[15].

En la Figura 2.1 se puede apreciar un diagrama del proceso de descarga de una batería de ion litio, donde el cátodo está compuesto de LFP y el ánodo de grafito. La batería se conecta externamente mediante un colector de corriente de cobre. Se observa gráficamente que los iones Li^+ se transportan desde el ánodo de grafito, hacia el electrolito hasta llegar al cátodo.

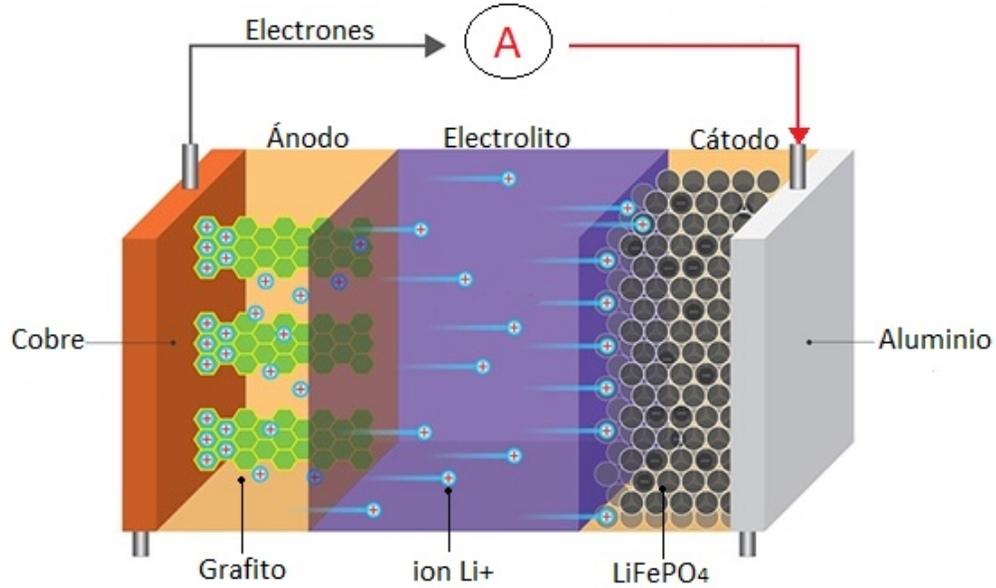


Figura 2.1: Diagrama proceso de descarga de batería ion-Litio LFP, figura adaptada [16].

Entre las mejores cualidades de las baterías de ion-litio destacan: alta energía y potencia específicas, eficiencia elevada, gran flexibilidad de regímenes de carga y descarga, autodescarga relativamente baja. Entre sus desventajas se encuentran su elevado costo y su inestabilidad térmica, potencialmente peligrosas en caso de sobrecarga, lo que exige la incorporación de circuitos de control y monitorización que encarecen su precio final[15].

2.2. Hidrógeno Verde *Fuel Cell*

El hidrógeno como vector energético, posee una gran ventaja y es que almacena mayor flujo de energía por unidad de peso que cualquier otra sustancia y su combustión produce vapor de agua. El hidrógeno posee un elevado Poder Calorífico Inferior (PCI) de $120 [MJ/kg]$, este valor representa 2,79 veces el PCI de la gasolina, siendo este último de $42,89 [MJ/kg]$ [17], sin embargo la densidad energética es bastante baja ($0,0899 [kg/Nm^3]$ en estado gaseoso y $0,0708 [kg/Nm^3]$ en estado líquido), esto produce que la entalpía disponible por unidad de volumen sea menor que la del diesel, gas natural y otros combustibles convencionales. A modo de comparación, la densidad energética de la gasolina es $0,72 [kg/Nm^3]$.

Los sistemas de almacenamiento energético basados en hidrógeno son considerados viables para ser integrados en sistemas avanzados de suministro de energía a gran escala, los componentes del sistema de hidrógeno que consisten en el electrolizador, tanque de almacenamiento de hidrógeno y *Fuel Cell*, tienen la capacidad de convertir la energía eléctrica en energía química (hidrógeno), almacenarla y convertirla de nuevo en electricidad cuando sea necesario[18].

Un factor importante que permite que el sistema de almacenamiento de hidrógeno sea un buen candidato para los sistemas conectados a la red es el tiempo de respuesta ante las variaciones de generación eléctrica, se ha demostrado que los electrolizadores pueden responder lo suficientemente rápido para participar en los mercados de electricidad y servicios auxiliares, incluyendo reservas de contingencia, seguimiento de carga y regulación[19].

Una *Fuel Cell* de hidrógeno utiliza este gas como combustible y oxígeno como oxidante. El hidrógeno se inyecta por el ánodo y el oxígeno por el cátodo. Otros combustibles utilizados son hidrocarburos, alcoholes e incluso metales, mientras que los oxidantes incluyen aire, cloro y dióxido de cloro. Cuando los fluidos son hidrógeno y oxígeno, además de producir energía eléctrica, el resultado de la reacción es agua[20].

La generación eléctrica mediante una *Fuel Cell* de hidrógeno no produce emisiones directas de carbono durante la operación, sin embargo, existen emisiones de carbono generadas en la fase de producción de la *Fuel Cell* que son importantes de contabilizar para obtener una cuatificación real del impacto ambiental (asociado al potencial de calentamiento global) producido por esta tecnología. Sumado a esto, existen impactos ambientales asociados a la extracción de metales requeridos para la producción del sistema de *Fuel Cell* como el aluminio y el cobre.

En definitiva, para utilizar el hidrógeno como almacenamiento energético, se deben considerar 3 etapas: la obtención del combustible hidrógeno a partir del proceso de electrólisis, el almacenamiento del combustible en un tanque de almacenamiento y la conversión del hidrógeno en energía eléctrica mediante una *Fuel Cell*.

2.2.1. Electrólisis

La electrólisis del agua es un proceso electroquímico que consiste en someter a las moléculas de agua a un campo eléctrico externo mayor que el campo eléctrico interno de la molécula y con la ayuda de un catalizador que tiene por función facilitar la transferencia de electrones entre el electrodo y los reactivos se logra separar la molécula obteniendo hidrógeno y oxígeno. En la ecuación 2.1 se muestra la reacción de electrólisis.



El proceso se realiza en un equipo llamado electrolizador que consiste en un apilamiento de electrodos conductores separados por una membrana a los cuales se aplica un potencial eléctrico y una intensidad elevada. Los distintos tipos de electrolizadores difieren entre sí principalmente por el tipo de electrolito que utilizan, dentro de los predominan están el electrolizador alcalino y los de membrana polimérica (PEM: Proton Exchange Membrane), debido a que son los más desarrollados tecnológicamente al día de hoy.

La electrólisis alcalina es el proceso más utilizado para la producción de hidrógeno a gran escala, ya que es la tecnología más madura. Utiliza un electrolito líquido que corresponde comúnmente a una solución entre 25 % y 30 % de concentración de hidróxido de potasio (KOH) el cual posee una alta conductividad a 70°C y 80°C aproximadamente. Los electrodos se componen principalmente de hierro, níquel, aleaciones de níquel y otros metales alcalinos resistentes con baja sobretensión en la reacción del electrodo. En condiciones estándar, el

potencial eléctrico de descomposición teórico del agua es de $1,23\text{ V}$, y el consumo de energía correspondiente es $2,95\text{ [kWh/m}^3\text{]}$. Sin embargo, el consumo de energía real de la electrólisis alcalina es de $4,4\text{-}5,4\text{ [kWh/m}^3\text{]}$ y la eficiencia de proceso alcanza valores entre 65% y 82% [21]. Sumado a esto, el equipo electrolizador posee una vida útil de 15 a 20 años, en un rango específico de 60.000 a 90.000 h de operación[21], siendo la vida útil más alta entre las tecnologías de electrólisis existentes al día de hoy.

Los electrolizadores PEM son considerados una opción a largo plazo, actualmente son ideales para aplicación a pequeña o mediana escala, utiliza un electrolito sólido que consiste en una membrana polimérica (principalmente de perfluorosulfónico) de características ácidas, la cual permite aislar el electrodo y transportar protones de hidrógeno desde el ánodo hasta el cátodo. La temperatura óptima de operación es de aproximadamente $80\text{ }^\circ\text{C}$, el potencial eléctrico de la electrólisis PEM es de $1,5\text{-}1,6\text{ V}$, el consumo de energía corresponde a $4,0\text{-}5,5\text{ [kWh/m}^3\text{]}$, y la eficiencia posee valores entre 65% - 78% . Los electrodos están compuestos de metales a base de platino y la membrana en sí es costosa, por lo que reducir el costo de PEM es un tema importante en la actualidad. Además, posee una vida útil menor a la electrólisis alcalina de 20.000 a 60.000 horas de operación[21].

En la Figura 2.2 se muestra una representación gráfica del funcionamiento de un electrolizador alcalino.

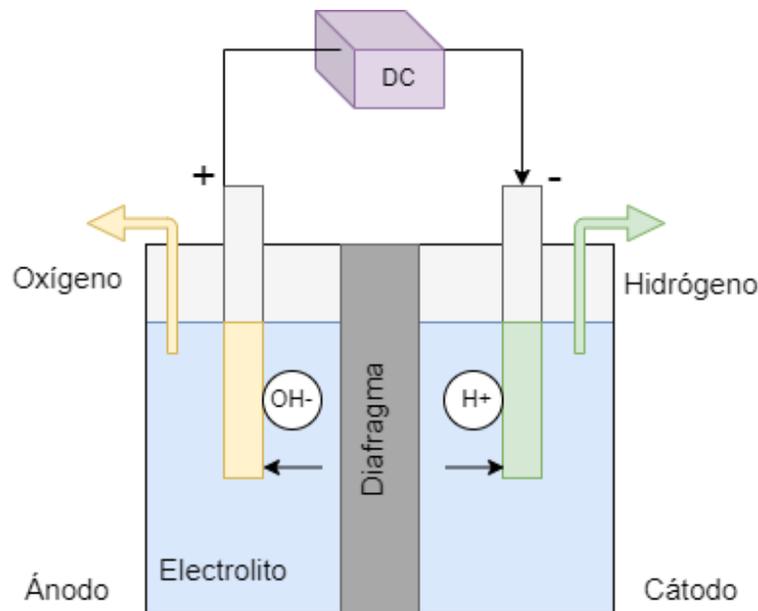


Figura 2.2: Diagrama del funcionamiento de un electrolizador alcalino, figura adaptada [22].

2.2.2. Almacenamiento

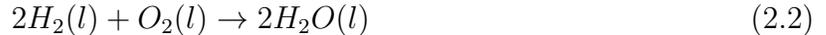
El almacenamiento de hidrógeno más utilizado es el almacenamiento de hidrógeno gaseoso comprimido dado que es una de las tecnologías de almacenamiento más simples y maduras. Como se menciona anteriormente, el hidrógeno posee una muy baja densidad energética, lo que implica requerir de grandes tanques de almacenamiento, es por esto que se debe

comprimir a altas presiones (200 bar a 700 bar)[23] y para almacenar se necesitan tanques o cilindros de acero inoxidable y muy resistentes que admiten presiones muy elevadas.

2.2.3. *Fuel Cell*

La *Fuel Cell* funciona de forma similar a una batería. Su funcionamiento está basado en las reacciones electroquímicas entre un combustible, en este caso el hidrógeno obtenido a partir de un proceso de electrólisis, y un oxidante, en este caso el oxígeno del aire. Se produce energía en forma de electricidad y calor mientras se le suministra combustible, como subproducto genera agua por lo que no emite CO_2 directamente[24].

Estas celdas funcionan en sentido inverso a la electrólisis y poseen dos electrodos, uno positivo (cátodo) y uno negativo (ánodo), separados por una membrana. Estos electrodos disponen de una conexión eléctrica el uno con el otro, situada fuera del electrolítico. El oxígeno se hace pasar por el cátodo y el hidrógeno por el ánodo. El hidrógeno reacciona gracias a la presencia de un catalizador en el ánodo que convierte las moléculas de gas hidrógeno (H_2) en electrones con carga negativa (e^-) e iones con carga positiva (H^+)[24]. En la ecuación 2.2 se muestra la reacción que ocurre en la *Fuel Cell*.



A diferencia de las baterías convencionales almacenadoras, que dependen de la cantidad de reactivos contenidos en ellas, las *Fuel Cell* necesitan de un suministro constante de reactivos para generar energía eléctrica, por lo que son capaces de producir energía eléctrica de manera constante, mientras no se agote el suministro de combustible y oxidante. Es decir funcionan como una batería continuamente alimentada, debido a esto se puede asociar el funcionamiento de la *Fuel Cell* con un reactor que funciona de forma continua.

El consumo de hidrógeno en una *Fuel Cell* libera energía y agua, esta última en la misma proporción inicial necesaria para su obtención. Se cierra así un ciclo en el que, mediante energías renovables, se produce hidrógeno y se utiliza éste mediante una reacción electroquímica liberando energía y el agua que se necesitó para su obtención. Una red eléctrica basada en ERNC, puede ser proyectada de forma que incluya la producción de hidrógeno permitiendo estabilizar la oferta energética de la demanda. De esta forma se podría alcanzar la principal ventaja que posee la generación de electricidad a partir de fuentes fósiles.

Existen diferentes tipos de *Fuel Cell*, y al igual que en los electrolizadores, su denominación viene determinada por el tipo de electrolito empleado. Entre los electrolitos más utilizados se encuentran los alcalinos, de óxido de sólido (SOFC: Solid Oxide *Fuel Cell*), membrana de intercambio iónico (PEFC: Proton Exchange *Fuel Cell*) y de carbonato fundido (MCFC: Molten Carbonate *Fuel Cell*).

Las *Fuel Cell* de óxido sólido tienen su base de funcionamiento en el electrolito cerámico basado en óxidos metálicos capaces de conducir iones a elevada temperatura (700-1000°C) con una eficiencia de operación que se encuentra en un rango de 50 % - 65 %. La elevada temperatura de funcionamiento de estas celdas SOFC se debe a los requerimientos de conducción de estos electrolitos cerámicos. El material electrolito sólido suele ser ZrO_2 estabilizado con itria (YSZ: Ytria-stabilized zirconia). Los materiales del electrodo incluyen níquel revestido

de ZrO_2 o YSZ para el ánodo y un conductor mixto iónico-electrónico para el cátodo. Los conductores electrónicos más utilizados son de la forma $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ (LSM) generalmente estabilizados con YSZ dado que presentan una estabilidad química a altas temperaturas, poseen una compatibilidad química con el electrolito además de características de expansión similares[25].

Para algunos casos, las altas temperaturas de funcionamiento de la SOFC pueden ser un problema en relación a la dificultad de operación del equipo, sin embargo este hecho permite sacar provecho de la energía térmica, utilizando sistemas de integración energética que permitan aumentar la eficiencia global del sistema, un ejemplo es utilizar el calor removido de la celda para calentar los fluidos o gases del sistema y con ello producir energía [25]. En la Figura 2.3 se muestra una representación gráfica del funcionamiento de una *Fuel Cell* óxido sólido.

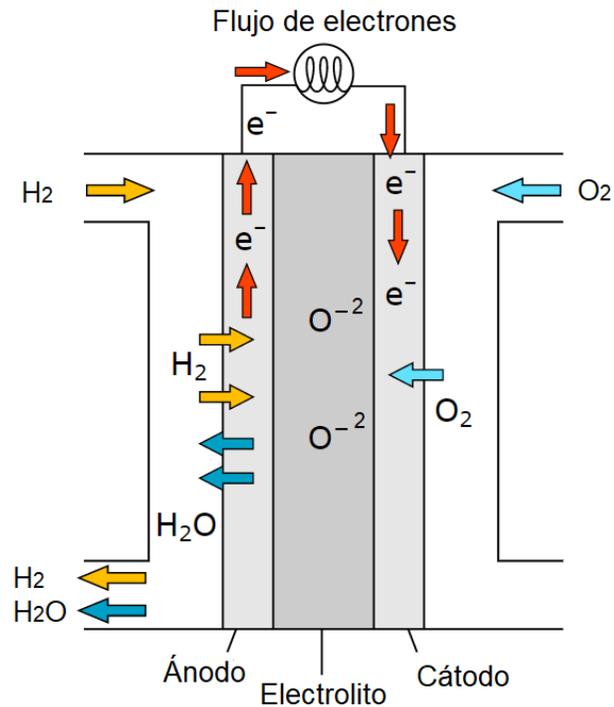


Figura 2.3: Diagrama del funcionamiento de una *Fuel Cell* óxido sólido, figura adaptada [26].

Capítulo 3

Metodología

3.1. Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que estudia los aspectos e impactos ambientales ambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio. Esto implica desde la adquisición materia prima, la producción, el uso u operación y la disposición final, cuantificando las entradas y salidas de materia y energía en las distintas etapas del ciclo [28]. Esta herramienta está normalizada por la Organización Internacional de Normalización mediante las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, donde se define que la metodología cuenta con cuatro fases de estudio: objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación[27]. En la Figura 3.1 se muestra el marco de referencia para la utilización de la herramienta ACV.

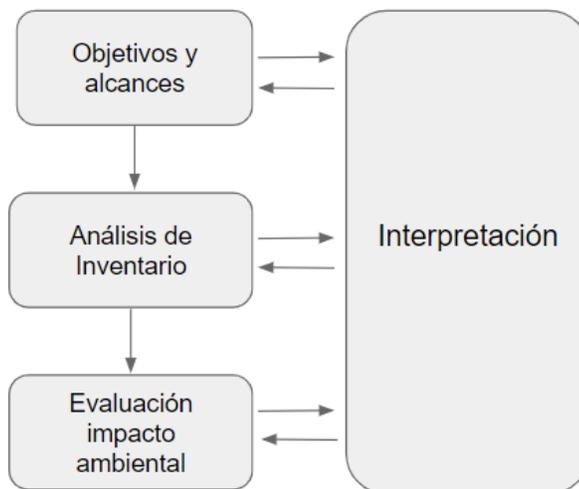


Figura 3.1: Marco de referencia de un Análisis de Ciclo de Vida. Adaptado de [28].

En las secciones siguientes, se detalla cada una de las etapas mencionadas anteriormente.

3.1.1. Objetivos y Alcances

En el objetivo se establece el tema de estudio, los motivos que llevan a realizarlo, el público objetivo del estudio y si los resultados serán utilizados con fines comparativos para ser luego

revelados al público. Por otro lado, el alcance especifica todos los detalles de la metodología, como el sistema del producto, la unidad funcional y los límites del sistema.

La Unidad Funcional describe la función principal del sistema analizado, proporcionando una referencia respecto a la cual las entradas y salidas del sistema pueden ser normalizadas en un sentido matemático. Esta referencia permite obtener resultados que puedan ser comparables según las categorías de impacto seleccionadas.

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV, para realizar un análisis más completo, usualmente se consideran las etapas dentro del límite *cradle to grave* (de la cuna a la tumba) donde se incluye la cadena de producción de energía y materiales y todos los procesos desde la extracción de materias primas, pasando por la producción, transporte y uso hasta llegar a la disposición final y el fin del ciclo de vida del producto. En el caso del análisis para un servicio, se considera la fabricación de equipos y suministros, la construcción, operación, mantención y desmantelamiento de la planta.

3.1.2. Análisis de Inventario

Es la segunda fase del ACV y se basa en la recopilación de datos y los procedimientos de cálculo para la cuantificación de entradas y salidas en relación con el sistema en estudio. El inventario del ciclo de vida es un proceso iterativo, ya que a medida que se obtienen datos y se aprende más del sistema, van apareciendo nuevos requerimientos o limitaciones que demandan un cambio en los procedimientos de manera que el objetivo aún se pueda cumplir.

La calidad de los datos es importante para poder entregar un grado de fiabilidad alto al estudio realizado. Estos pueden ser medidos, calculados o estimados. Para asegurar la calidad de datos es muy importante considerar la cobertura de tiempo, posición geográfica y la tecnología debido a que según estos parámetros los datos pueden ir variando. Considerando esto, es primordial el uso de una buena base de datos, la cual permita realizar el estudio de manera más eficiente. Una de las bases de datos que posee una buena calidad de información corresponde a *Ecoinvent* [29], utilizada ampliamente en estudios de ACV.

3.1.3. Evaluación de Impacto Ambiental

El objetivo de esta fase es cuantificar los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del inventario de ciclo de vida. La estructura de esta fase distingue entre elementos obligatorios y elementos opcionales, entre los elementos obligatorios se encuentran:

- Selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos.
- Clasificación: en esta fase se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.
- Caracterización: consiste en la modelación, mediante los factores de caracterización, de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto. Los factores de caracterización aluden a un valor representativo o indicador que relaciona al flujo

de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante.

Los elementos opcionales son normalización de los indicadores, agrupación y ponderación, los que permiten obtener un grado mayor de profundización para la posterior interpretación.

Con respecto a las categorías de impacto, existen tres grupos principales de categorías finales, esto quiere decir que producen un efecto directo en la sociedad, las cuales son: salud humana, entorno natural y recursos naturales. Estas categorías de impacto finales son calculados en base de un subconjunto de categorías de impacto intermedias o midpoint, debido a que no existe consenso científico acerca del cálculo de las categorías finales, usualmente se utilizan solamente las categorías intermedias. En la Figura 3.2 se ilustra el esquema de las categorías de impacto intermedias y finales.

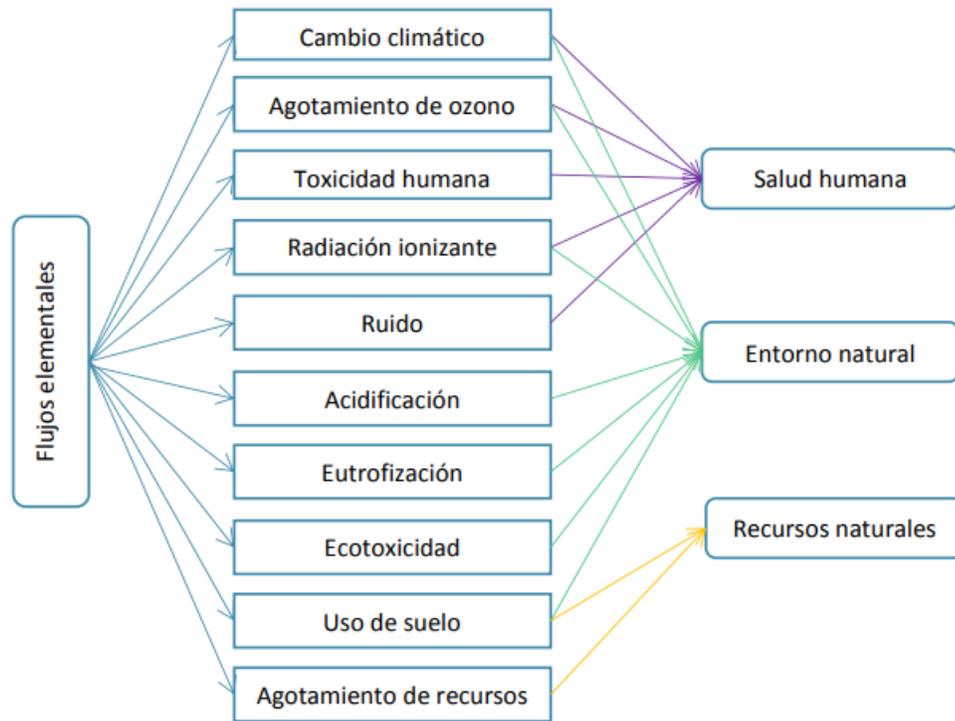


Figura 3.2: Esquema categorías de impacto para Análisis de Ciclo de Vida.
Figura adaptada de [30].

Cada una de estas categorías intermedias poseen índices de caracterización, con el objetivo de que diferentes emisiones que causan el mismo impacto se conviertan en una unidad que se traduce en una categoría de impacto. Por ejemplo la categoría Cambio Climático o Potencial de Calentamiento Global, se expresa en kg de CO_2 equivalentes ($kg\ CO_2\text{-eq}$). Sin embargo, otras emisiones de gases de efecto invernadero además de las emisiones de carbono (CO_2) también causan el cambio climático, como el metano (CH_4) o el óxido nitroso (N_2O)[31].

3.1.4. Interpretación

La fase de interpretación, es la última fase de la metodología donde se reúnen los resultados del análisis de inventario y evaluación de impacto con el fin de obtener conclusiones y se

reflexiona en función del alcance y objetivo del estudio. En esta etapa es importante evaluar la relevancia de los supuestos tomados en las etapas anteriores mediante un análisis de sensibilidad y ver cómo impacta en los resultados obtenidos. Sumado a esto, la interpretación permite identificar las etapas críticas del ciclo de vida, es decir en qué parte del proceso se generan los mayor impactos ambientales. En el caso de que se realice un Análisis de Ciclo de Vida comparativo, es posible identificar el producto o servicio que genera un menor impacto ambiental según las categorías de impacto escogida.

Finalmente, es posible determinar y proponer posibles mejoras en las etapas críticas del ciclo de vida, como cambiar materias primas e insumos que se utilizan en procesos productivos, o reemplazar operaciones unitarias por otras que generen un menor impacto.

Capítulo 4

Estado del Arte: Análisis de Ciclo de Vida de tecnologías de almacenamiento energético.

Este capítulo tiene por objetivo informar sobre estudios anteriores en el ámbito del Análisis de Ciclo de Vida de tecnologías de almacenamiento energético. Se analizan los resultados de cada estudio y se identifican las diferencias que se presentan en cuanto al análisis en el presente trabajo.

4.1. ACV de un sistema de suministro de energía ininterrumpida a base de hidrógeno que utiliza energía renovable [32].

El estudio M, Mori. *et al.*(The International Journal of Life Cycle Assessment., 2014) proporciona una evaluación empírica de un Sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) basado en tecnologías de hidrógeno (HT-UPS) que utiliza fuentes de energía renovables que se basa en la cuantificación de los impactos ambientales y comparación con un sistema UPS basado en el motor de combustión interna (ICE-SAI). Se realiza la evaluación mediante 4 categorías de impacto; potencial de calentamiento global, acidificación, agotamiento abiótico y eutrofización. La categoría de acidificación mide la posible acidificación de suelos y aguas debido a la liberación de gases como óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre, mientras que la eutrofización mide el aumento de elementos nutritivos en el ecosistema debido a emisión de compuestos que contienen nitrógeno o fósforo.

En cuanto a los resultados, la comparación de dos tecnologías diferentes para proporcionar UPS, ha demostrado que en todo las categorías de impacto, excepto la eutrofización, el HT-UPS es el sistema de menor impacto. La mayoría de los impactos ambientales de HT-UPS son el resultado de la fase de fabricación. Por el contrario, en el sistema ICE-UP los impactos ambientales resultan principalmente de la fase operativa.

A partir del estudio, se puede concluir que el sistema de hidrógeno como almacenamiento es una alternativa que genera menos impactos ambientales en comparación con tecnologías

convencionales como el motor de combustión interna. A diferencia del estudio mencionado, el presente trabajo se enfocará en comparar el hidrógeno como almacenamiento energético con una tecnología que se encuentra en potencial desarrollo como una opción de batería más sostenible.

4.2. ACV de procesos de producción de baterías [33].

El estudio Q. Wang *et al* (Journal of cleaner production., 2018) se basa en la evaluación del ciclo de vida se aplica para analizar y comparar el impacto ambiental de la batería de plomo-ácido (LAB), la batería de litio-manganeso (LMB) y batería de fosfato de hierro y litio (LIPB) dentro del límite del sistema de "cradle-to-gate". Dentro de las categorías de impacto que se evaluaron están potencial de calentamiento global y agotamiento de recursos abióticos.

Los resultados mostraron que el impacto general de la producción de LIPB en el medio ambiente es el más pequeño, mientras que la producción de LAB causa el mayor impacto. Las materias primas clave que causan el impacto ambiental del proceso de producción de LAB son el plomo y el estaño refinados. El manganato de litio y el aluminio son las sustancias clave que causan el impacto ambiental del proceso de producción de óxido de manganeso y litio.

Se concluye que las baterías de litio son una alternativa que genera menor impacto ambiental con respecto a las baterías de plomo-ácido.

4.3. ACV comparativo de bicicletas eléctricas impulsadas por baterías de litio y Hidrógeno *Fuel Cell* [34]

El estudio S. Mellino *et al*. (International Journal of Hydrogen Energy., 2017) tiene como objetivo comparar dos tipos de vehículos, bicicleta eléctrica impulsada por baterías de litio (E-bike) y una que funciona con pila de combustible de hidrógeno (H-bike), utilizando como referencia vehículos de motor de combustión interna. La evaluación mediante ACV de las fases de producción del vehículo muestra que la construcción de la H-bike resulta más impactante que la E-bike en todas las categorías consideradas debido a la presencia de tecnología de componentes más compleja. En cambio, cuando el límite se traslada a las fases operativas de los vehículos, incluidos los portadores de energía producción, la situación se invierte y el comportamiento medioambiental de la H-bike resultados mejores que el de E-bike.

En base a los resultados se puede concluir que en el contexto de transporte, el almacenamiento de energía mediante Hidrógeno *Fuel Cell* presenta mayor impacto ambiental en la etapa de fabricación que las Baterías de Litio, sin embargo en la fase de operación este resultado se revierte, por lo que la tecnología que presenta un mayor impacto ambiental dependerá del tiempo de vida útil que se del vehículo.

Capítulo 5

Objetivos y Alcances del Análisis de Ciclo de Vida

El siguiente capítulo se realiza la primera etapa del ACV, donde se define el objetivo y los alcances del estudio siguiendo la metodología establecida por la herramienta Análisis de Ciclo de Vida. Se abordará los límites del sistema para el caso de estudio, la unidad funcional y las categorías de impacto.

5.1. Objetivos del Análisis de Ciclo de Vida

En base al contexto mencionado en el Capítulo 1, se identifica una problemática que surge ante la necesidad de expandir las ERNC y construir un camino hacia la independencia de los combustibles fósiles. Esta problemática es la producción de energía de forma variable que tienen las ERNC, condicionada por las condiciones climáticas y temporales. La posible solución a esta problemática es integrar tecnologías de almacenamiento energético que permitan entregarle estabilidad al sistema de electricidad basado en ERNC.

Considerando la proyección de Chile en cuanto a la implementación de ERNC, se proyecta que el desarrollo y adquisición de tecnologías de almacenamiento energético recibirá gran consideración. De ahí nace la necesidad de evaluar y comparar ambientalmente las tecnologías de almacenamiento que poseen mayor potencial a instalarse en Chile.

Evaluar y comparar el impacto ambiental del almacenamiento energético en una planta fotovoltaica para dos casos de estudio:

- Sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*
- Sistema de Baterías ion-Litio

La cuantificación del impacto ambiental se hará mediante las categorías de impacto Potencial de Calentamiento Global (Global Warming) y Agotamiento de Recursos Minerales (Metal depletion). El fin del estudio es evaluar ambientalmente ambas alternativas de almacenamiento energético para identificar cuál es más significativa en cuanto al impacto ambiental, además de identificar las etapas críticas y posibles mejoras en cada caso de estudio.

5.2. Alcance del estudio

5.2.1. Casos de estudio

5.2.1.1. Planta Fotovoltaica

Con el fin de poder comparar las tecnologías de almacenamiento energético, se sitúan los dos casos de estudio bajo el mismo contexto y se toma el supuesto de que los sistemas de almacenamiento se desarrollan en una planta fotovoltaica ubicada en la comuna de Diego de Almagro, Región de Atacama, Chile.

La justificación se basa en que la región de Atacama tiene uno de los mayores potenciales solares del mundo, con casi 365 días de cielo despejado, alta radiación solar y baja humedad, proporcionando una importante oportunidad para contribuir a la diversificación energética del país, específicamente el desierto de Atacama es la región con mayor radiación solar del mundo ($275 [W/m_2]$)[35]. La comuna de Diego de Almagro es una de las zonas de la región de Atacama con mayor radiación solar promedio ($7 [kWh/m_2/día]$). En la Figura 5.1 se presenta la radiación solar promedio de las principales comunas de la Región de Atacama.

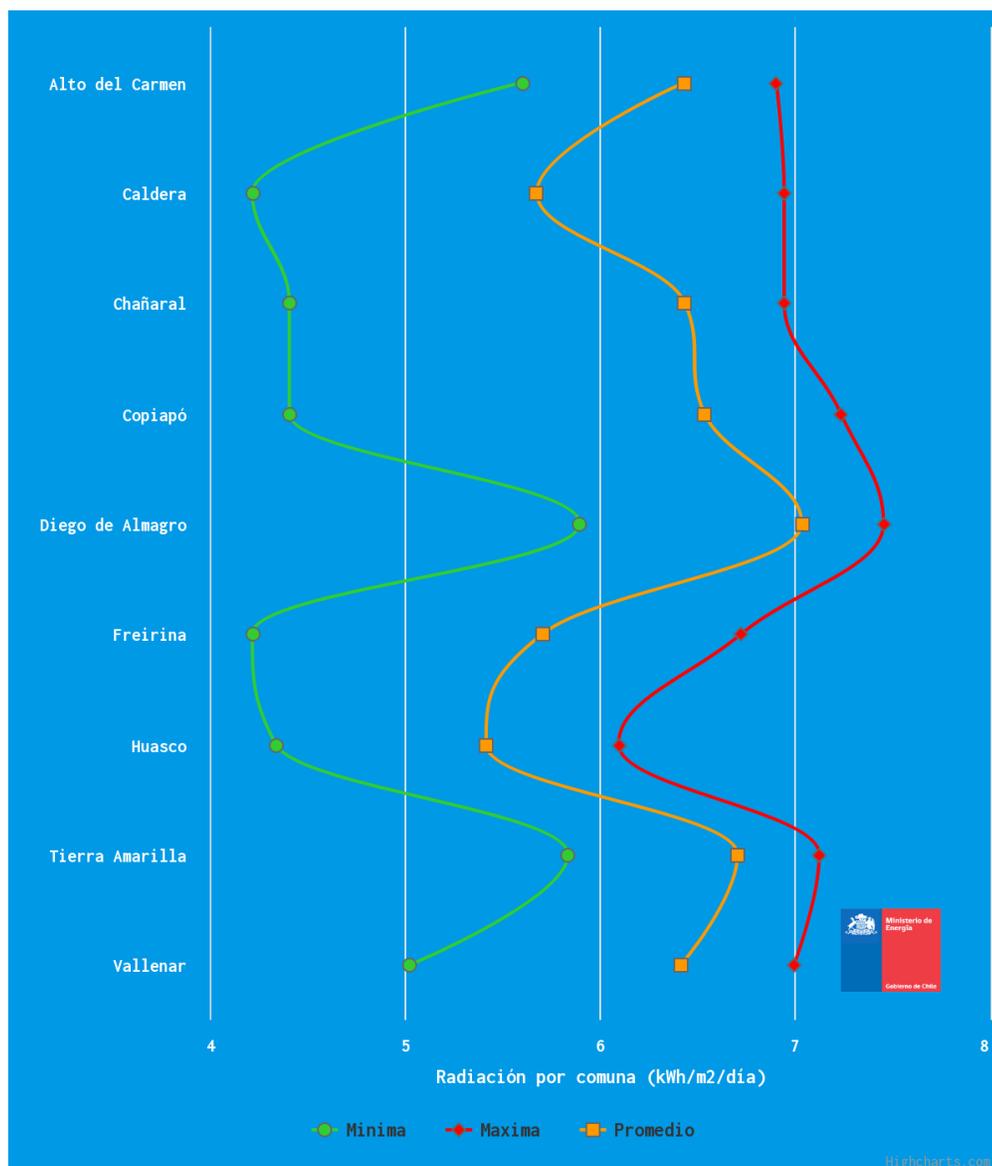


Figura 5.1: Radiación solar por comuna en la Región de Atacama. [36]

Sumado a esto, actualmente existen proyectos en desarrollo de integración de almacenamiento energético en plantas fotovoltaicas de esta zona. Específicamente, un sistema de baterías de ion-Litio de 8 [MW] se ubicará en la región de Atacama, junto a la planta fotovoltaica Diego de Almagro Sur (230 MW) de Colbún, y se espera que entre en operación el cuarto trimestre de 2022, beneficiando a alrededor de 80.000 hogares[37].

El tiempo de almacenamiento energético que se asumirá en la planta es de 10 [h], debido a que este es el tiempo que se tiene radiación solar durante el día. Considerando que el día tiene 24[h], se estima que en las horas donde no hay radiación solar, el sistema de almacenamiento estará entregándole la energía almacenada a la red. Por lo tanto, el tiempo de suministro del sistema de almacenamiento será de 14 [h].

5.2.1.2. Sistema de Baterías ion-Litio

El sistema de baterías ion-Litio, considera específicamente un conjunto de baterías conectadas en serie con un potencial eléctrico nominal de 51,2 [V] y una capacidad de descarga de 400 [Ah]. Cada batería pesa 180 [kg], y la composición del cátodo corresponde a litio ferrofosfato (LiFePO4). Las características de las baterías están basadas en el modelo *48V400AhLFP* fabricadas por la empresa *PKE New Energy* en Shenzhen, China, especializada en la producción y venta de soluciones de almacenamiento de energía renovable y sistemas de baterías de iones de litio[38][39]. En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los parámetros principales del sistema de baterías.

Tabla 5.1: Parámetros principales del sistema de baterías.

Descripción	Magnitud	Unidad
Potencial eléct. nominal	51,2	[V]
Potencial eléct. máximo	58,4	[V]
Capacidad de descarga	400	[A h]
Masa	180	[kg]

5.2.1.3. Sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*

El sistema Hidrógeno *Fuel Cell* considera los tres subsistemas principales, electrolizador alcalino, tanque de hidrógeno y *Fuel Cell* óxido sólido (*Fuel Cell*). Por añadidura, se consideran los equipos auxiliares del sistema que permiten transportar, calentar, enfriar, y comprimir gases y fluidos. Con el objetivo de aumentar la eficiencia del sistema, se considera una integración energética que aprovecha el calor emitido por la *Fuel Cell* para calentar los fluidos que entran al mismo equipo mediante intercambiadores de calor. Por otro lado, se considera que el sistema es cerrado en cuanto al flujo de agua e oxígeno, es decir existe una reintegración de ambos flujos desde la salida de la *Fuel Cell* hacia la entrada del electrolizador, de modo que se asume que ambos flujos másicos se mantienen constantes durante la operación.

En la Figura 5.2 se muestra el diagrama del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

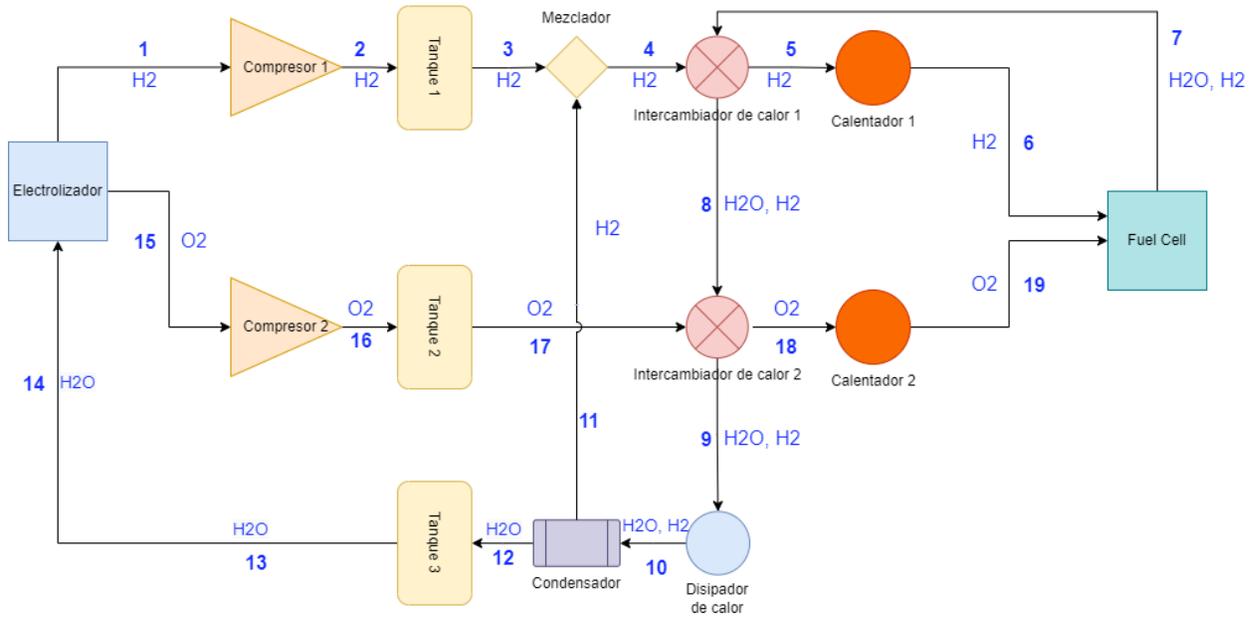


Figura 5.2: Diagrama de flujo del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

El sistema comienza cuando se le suministra energía eléctrica desde la planta fotovoltaica al electrolizador alcalino, este equipo opera a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 9 [bar] por lo que la corriente 1 de H_2 y la corriente 15 de O_2 salen a la misma temperatura y presión. Ambas corrientes ingresan a un proceso de compresión con el objetivo de almacenar los gases en tanques de almacenamiento, el hidrógeno debe ser almacenado a 200 [bar] , mientras que el O_2 se almacena a 17 [bar] , por lo que las corrientes 1 y 15 se comprimen desde 9 bar hasta sus respectivas presiones de almacenamiento.

Una vez que el proceso de almacenamiento termina y es necesario suministrar la energía almacenada, comienza a funcionar la *Fuel Cell*, este equipo posee una temperatura de operación de $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una presión de operación de 1 [bar] . En el equipo se produce la oxidación del H_2 que se alimenta del reactivo O_2 de la corriente 19 hasta consumirlo por completo, a partir de la reacción se obtiene en la salida una corriente 7 de H_2O y potencia eléctrica para ser suministrada en la red. Se considera que la corriente 7 contiene además un porcentaje de hidrógeno que no se consumió en el equipo de *Fuel Cell*, esto se debe a que es importante dejar un margen de combustible sin reaccionar para evitar que la diferencia de presión entre los electrodos provoque corrosión y degradación de materiales y componentes de la celda limitando su vida útil. El porcentaje óptimo de combustible sin reaccionar varía entre un 30% y 10% del flujo de combustible de entrada[40], en este caso se asume que un 25% de la corriente de H_2 de entrada no reacciona en la *Fuel Cell* y sale en la corriente 7 junto con el H_2O , sin embargo este porcentaje sin reaccionar de hidrógeno se vuelve a integrar en el sistema.

La integración energética consiste en utilizar la energía térmica proveniente de la *Fuel Cell*. La corriente 7 que sale de la *Fuel Cell* a una temperatura de $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ se integra a intercambiadores de calor para aumentar la temperatura de las corrientes 4 de H_2 y 7 de O_2 , de esta forma se calientan ambas corrientes para obtener una temperatura cercana a los $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se ahorra energía en los calentadores. Finalmente, la corriente de H_2 y agua que sale de

la *Fuel Cell* se enfría debido a los procesos de intercambio de calor, se ingresa a un disipador de calor hasta obtener una temperatura de 99,61 °C (temperatura de saturación del agua a 1 [bar]) y mediante un proceso de condensación, se separan ambos flujos y se reintegra al hidrógeno para ser utilizado en la *Fuel Cell*. Por otro lado el agua se almacena en un tanque hasta que se vuelva a utilizar el electrolizador como reactivo y vuelve a ingresar al sistema cerrado.

5.2.2. Unidad Funcional

La elección de la unidad funcional en los estudios de Análisis de Ciclo de Vida es de suma importancia, aún más cuando el estudio tiene un fin comparativo dado que se debe reflejar la cuantificación y comparación de forma equivalente. En este caso, la unidad funcional corresponde al suministro de 1[MW] de potencia ininterrumpida durante 24 [h] en un horizonte temporal de 25 años.

5.2.3. Límites del sistema

Se definen los límites del sistemas como de "la cuna a tumba" (*cradle to grave*). Específicamente, se considera 3 macro etapas del sistema: Instalación, Mantenimiento y Desmantelamiento. En la Figura 5.3 se muestra un diagrama de las macro etapas del estudio.



Figura 5.3: Diagrama de las macro etapa de los límites del sistema de estudio.

- **Instalación:** La etapa de instalación considera la fabricación de los equipos principales de la planta solar como lo son los paneles solares y el balance del sistema (transformador e inversor), además se considera la fabricación de los equipos de almacenamiento respectivos para cada caso de estudio. Finalmente, considera el transporte de importación de los equipos principales desde China a Chile. Se excluye de esta etapa la construcción de la planta pues el enfoque principal del estudio está en comparar las tecnologías de almacenamiento y no en cuantificar los impactos de la planta misma.
- **Mantenimiento:** En esta etapa se considera la reposición de los equipos según la vida útil de cada uno. Sumado a esto, considera el transporte de importación de los equipos que se requieran renovar. No se considera el mantenimiento de los equipos del tipo limpieza ya que presenta menos incidencia en la cuantificación.
- **Desmantelamiento:** En esta etapa se considera el fin de vida de los equipos, tanto de los paneles solares como los equipo del balance del sistema (inversor y transformador) y los equipos de desmantelamiento. No se considera el transporte de los equipos hacia un destino final.

5.2.4. Calidad de los datos

Los datos que se utilizan para caracterizar las entradas y salidas de materias para ambos casos de estudio se obtuvieron de bibliografía, se adapta la cuantificación de los flujos de materia al caso específico mediante balances de masa y energía. Para asegurar la calidad de los datos se da preferencia a los datos más actuales y representativos a sistemas de almacenamiento conectados a la red.

Se cuenta con licencia académica para utilizar la base de datos *Ecoinvent*, a partir de esta se obtiene los factores de emisión relacionados principalmente a la materialidad de las entradas y salidas del sistema. La base de datos *Ecoinvent* contiene información sobre el proceso industrial o agrícola de producción, midiendo los recursos naturales extraídos del medio ambiente, las emisiones liberadas al agua, suelo y aire, los servicios demandados de otros procesos (electricidad) y los productos, coproductos y desechos producidos.

5.2.5. Categorías de impacto

Existen múltiples categorías de impacto intermedias o midpoint, que permiten evaluar distintos impactos ambientales según el objetivo del estudio. En este caso, se escogen dos categorías de impacto a evaluar, que se adecuan a los objetivos del estudio: Potencial de Calentamiento Global y Agotamiento de Recursos Minerales.

5.2.5.1. Potencial de Calentamiento Global

La categoría impacto ambiental Potencial de Calentamiento Global (GWP: Global Warming Potential) se define como la cuantificación de emisión de gases de efecto invernadero en todo el ciclo de vida del proceso o producto. Se escogió esta categoría dado que el objetivo de las tecnologías a estudiar es disminuir las emisiones de efecto invernadero, es por esto que es necesario cuantificar la emisión real de las tecnologías verdes que muchas veces pueden parecer *carbono cero*, sumado a esto es la categoría más estudiada en las Análisis de Ciclo de Vida relacionados a energía renovables, donde la mayoría de las emisiones GEI provienen de la fabricación de los equipos y materiales.

El GWP es una medida de la capacidad que tienen diferentes GEI en la retención del calor en la atmósfera, ya que no todos los gases absorben la radiación infrarroja de la misma manera ni todos tienen igual vida media en la atmósfera. Es por esto que el IPCC publica periódicamente los valores del índice de GWP que cuantifica la fuerza de radiación de un determinado GEI utilizando como referencia el CO_2 , por lo que el potencial de calentamiento global de este GEI es igual a 1. Cuanto más alto sea el GWP que produce un gas, mayor será su capacidad de retención del calor en la atmósfera. Por lo tanto, este índice depende del GEI analizado, para evaluaciones a largo plazo se considera usualmente a 100 años, los valores entregados por informe del IPCC del año 2020 pueden verse en la Tabla 5.2[41].

5.2.5.2. Agotamiento de Recursos Minerales

La categoría de impacto Agotamiento de Recursos Abióticos Minerales conocido por sus siglas en inglés MD (MD: Metal Depletion) es un indicador del agotamiento de los recursos naturales no fósiles como metales y minerales. Esta categoría es de suma importancia dado

Tabla 5.2: Factores de potencial de calentamiento global a 100 años [41].

GEI	Valor	Unidad
Dióxido de carbono (CO_2)	1	$[kgCO_2eq/kgCO_2]$
Metano (CH_4)	28	$[kgCO_2eq/kgCH_4]$
Óxido nitroso (N_2O)	265	$[kgCO_2eq/kgN_2O]$

que los recursos minerales son finitos y es importante calcular el impacto que conlleva la extracción de estos. Sin embargo, el agotamiento de los recursos es una de las categorías de impacto más debatidas ya que no existe un método científicamente consensuado para obtener los factores de caracterización. Una de las razones por las que ocurre esto es que existen diversas formas de definir el problema del agotamiento de recursos, y todas pueden justificarse desde diferentes puntos de vista, dado que todas dependen de la disponibilidad supuesta y demanda del recurso en el futuro y de las tecnologías futuras.

El método de caracterización de referencia considerado como la mejor práctica actual disponible para la categoría en cuestión es el método recomendado en el Manual Holandés de ACV (Guinée, et al.2002)[42]. El método de caracterización se define a continuación.

$$AgoRA = \sum_i ADP_i \cdot m_i \quad (5.1)$$

Con m_i como el flujo del recurso i utilizado en kg y ADP como el factor de caracterización “potencial de agotamiento abiótico” definido como[43]:

$$ADP = \frac{1}{x} \quad (5.2)$$

Donde x puede ser los siguientes factores de caracterización:

R_i : Reserva del recurso i en kg .

R_{ref} : Reserva del recurso de referencia antimonio o hierro en kg .

DR_i : Tasa de extracción del recurso i en $kg/año$

DR_{ref} : Tasa de extracción del recurso de referencia antimonio o hierro en $kg/año$.

Capítulo 6

Análisis de Inventario

En este capítulo, siguiendo la metodología propia de un estudio de ACV, se presentan los datos relacionados con cada uno de los casos a evaluar, los cálculos necesarios para obtener los flujos requeridos y los supuestos tomados en cada uno de ellos.

6.1. Balance de masa y energía

En esta sección se definen los balances de masas y energía desarrollados para cada caso de estudio.

6.1.1. Hidrógeno Verde *Fuel Cell*

6.1.1.1. Balance de Masa

El balance de masa se hizo considerando los siguientes supuestos.

En primer lugar, para los equipos en donde no ocurre una reacción química, se asume que el flujo molar de entrada es igual al flujo molar de salida. Esto ocurre en los equipos de compresión e intercambiadores de calor. Por lo tanto se plantea un balance molar en tales equipos para la especie i de la siguiente forma. El súper índice denota el número del flujo en el sistema que se presenta en la Figura 5.2.

$$n_i^e = n_i^s \quad (6.1)$$

Dado que el tiempo de almacenamiento del sistema es distinto al tiempo de suministro, se debe ponderar el flujo molar por el tiempo durante cual dicho flujo entra o sale del equipo en cuestión (como es el caso de los tanques de almacenamiento). En ese caso la expresión queda de la forma.

$$n_i^e \cdot t_{alm} = n_i^s \cdot t_{sum} \quad (6.2)$$

En el equipo que ocurre una separación física de especies (hidrógeno y agua) se asume que la separación es perfecta y se logra debido a que las especies se encuentran en distinto estado, el hidrógeno se encuentra en estado gaseoso, y el agua en estado líquido. En definitiva, si en la entrada entran las especies j e i , en la salida 1 sale la especie i y en la salida 2 sale la especie

j, la expresión queda de la siguiente forma.

$$n_i^e = n_i^{s1} \quad (6.3)$$

$$n_j^e = n_j^{s2} \quad (6.4)$$

En los equipos que ocurre una mezcla de flujos de una misma especie, se expresa el balance molar:

$$n_i^{e1} + n_i^{e2} = n_i^s \quad (6.5)$$

Los equipos donde ocurre una reacción electroquímica son el electrolizador alcalino y la *Fuel Cell* óxido sólido. Para conocer el flujo molar de hidrógeno producido en el caso del electrolizador y consumido en el caso de la *Fuel Cell*, se debe utilizar la Primera Ley de Faraday de la electrólisis, la cual describe que la masa de una carga eléctrica depositada en un electrodo durante la electrólisis es directamente proporcional a al flujo de electricidad transferida a este electrodo[44][45].

$$n = \frac{1}{\alpha_e \cdot F} \cdot I \quad (6.6)$$

donde:

n [mol/s]: Flujo molar de la especie en cuestión producida o consumida por el equipo.

α_e [mol/mol-eq]: Coeficiente de carga eléctrica.¹

I [A]: Intensidad de corriente a través de los electrodos.

La intensidad de corriente se puede definir como flujo de electrones o iones que se transportan a través de un espacio determinado. En efecto, se puede definir como la densidad de corriente multiplicado por la unidad de sección de área transversal.

$$I = j \cdot A \quad (6.7)$$

donde:

I [A]: Intensidad de corriente.

j [A/m²]: Densidad de corriente.

A [m²]: Área de transferencia.

De esta forma, se puede definir la ecuación 6.6 de la siguiente manera:

$$n = \frac{1}{\alpha_e \cdot F} \cdot j \cdot A \quad (6.8)$$

Sumado a esto, se puede dimensionar el área del electrodo del equipo con la siguiente ecuación.

$$A = \frac{W}{j \cdot U} \quad (6.9)$$

donde:

A [m²]: Área transversal del electrodo del equipo.

j [A/m²]: Densidad de corriente.

W [W]: Potencia del electrolizador o la *Fuel Cell* según corresponda.

¹ El coeficiente de transferencia de carga eléctrica es una medida de la velocidad a la que se produce la transferencia de electrones a través de la interfase electrodo - electrolito.

$U[V]$: Potencial eléctrico de operación del electrolizador o *Fuel Cell* según corresponda.

A partir de las ecuaciones 6.8 y 6.9 se logra obtener una expresión para calcular el flujo molar de hidrógeno a la salida del electrolizador y a la entrada de la *Fuel Cell*.

$$n_{H_2} = \frac{1}{\alpha_e \cdot F} \cdot \frac{W}{U} \quad (6.10)$$

En base a las ecuaciones descritas anteriormente, es posible realizar un balance de masa de las especies involucradas en el sistema.

En la *Fuel Cell*, se tiene la reacción electroquímica que ocurre en este equipo como se muestra en la ecuación 2.2. En esta reacción, el reactivo limitante es el oxígeno, es decir que se agota por completo, por lo tanto la relación entre el flujo molar de óxígeno que entra a la *Fuel Cell* ($n_{O_2}^{19}$), el flujo molar de hidrógeno que entra ($n_{H_2}^6$) al equipo y el flujo molar de hidrógeno que no reacciona ($n_{H_2}^7$).

$$n_{H_2}^7 = n_{H_2}^6 - 2n_{O_2}^{19} \quad (6.11)$$

Por otra parte, existe una la relación entre el hidrógeno que entra a la *Fuel Cell* y el hidrógeno que sale del mismo equipo, el valor de la relación definida x_r corresponde a 0,25.

$$x_r = \frac{n_{H_2}^7}{n_{H_2}^6} \quad (6.12)$$

Juntando ambas ecuaciones se obtiene las siguientes expresiones.

$$n_{O_2}^{19} = \frac{1}{2}n_{H_2}^6(1 - x_r) \quad (6.13)$$

$$n_{H_2O}^7 = n_{H_2}^6(1 - x_r) \quad (6.14)$$

A partir de las Ecuaciones 6.11 y 6.13 se puede obtener la siguiente expresión.

$$n_{H_2}^7 = n_{H_2}^6 - n_{H_2}^6(1 - x_r) \quad (6.15)$$

El flujo 7 de H_2 y H_2O que sale de la *Fuel Cell*, ingresa al intercambiador de calor 1. Dado que se asume que no se producen cambios de masa se utiliza la ecuación 6.1.

$$n_{H_2, H_2O}^7 = n_{H_2, H_2O}^8 = n_{H_2, H_2O}^9 \quad (6.16)$$

El flujo 9 sale del Intercambiador de calor 2 e ingresa al Disipador de calor para disminuir la temperatura de la corriente y posteriormente ingresar al Condensador con el objetivo de separar las especies que lo componen. Se utiliza las Ecuaciones 6.1,6.3,6.4 ya que se asume nuevamente que la transferencia de calor no implica cambios en la masa y la separación de las especies en el condensador es perfecta.

$$n_{H_2, H_2O}^9 = n_{H_2, H_2O}^{10} \quad (6.17)$$

$$n_{H_2}^{10} = n_{H_2}^{11} \quad (6.18)$$

$$n_{H_2O}^{10} = n_{H_2O}^{12} \quad (6.19)$$

En los Calentadores 1 y 2, se mantiene constante el flujo y se utiliza la Ecuación 6.1.

$$n_{H_2}^5 = n_{H_2}^6 \quad (6.20)$$

$$n_{O_2}^{18} = n_{O_2}^{19} \quad (6.21)$$

En el caso del Mezclador, se mezclan los flujos 3 y 11, para dar salida al flujo 4. Utilizando la Ecuación 6.5 se obtiene la siguiente expresión.

$$n_{H_2}^4 = n_{H_2}^3 \cdot \frac{1}{1 - x_f} \quad (6.22)$$

En los Tanque de Almacenamiento 1, 2 y 3 existe un flujo que depende del tiempo de almacenamiento. Específicamente, en el Tanque de Almacenamiento 1 el flujo 2 ingresa al tanque por un tiempo t_{alm} y sale el flujo 3 por un tiempo t_{sum} , en el Tanque de Almacenamiento 2 entra el flujo 15 por un tiempo t_{alm} y sale el flujo 16 por un tiempo t_{sum} y en el Tanque de Almacenamiento 3 entra el flujo 12 por un tiempo t_{sum} y sale por un tiempo t_{alm} . Se utiliza la Ecuación 6.2 y se obtienen las siguientes expresiones.

$$n_{H_2}^3 = n_{H_2}^2 \cdot \frac{t_{alm}}{t_{sum}} \quad (6.23)$$

$$n_{O_2}^{15} = n_{O_2}^{16} \cdot \frac{t_{alm}}{t_{sum}} \quad (6.24)$$

$$n_{H_2O}^{12} = n_{H_2O}^{13} \cdot \frac{t_{sum}}{t_{alm}} \quad (6.25)$$

En los Compresores 1 y 2, se utiliza la Ecuación 6.1 dado que se asume que no hay pérdida de masa en el proceso de compresión.

$$n_{H_2}^1 = n_{H_2}^2 \quad (6.26)$$

$$n_{O_2}^{15} = n_{O_2}^{16} \quad (6.27)$$

En el equipo Electrolizador, ocurre la reacción electroquímica descrita en la Ecuación 2.1. Dado que se considera que el reactivo limitante es el agua, es decir que se consume por completo, se obtienen las siguientes relaciones.

$$n_{H_2}^1 = n_{H_2O}^{14} \quad (6.28)$$

$$n_{O_2}^{15} = \frac{1}{2} n_{H_2O}^{14} \quad (6.29)$$

Una vez que se obtienen todas las expresiones del balance de masa, es posible dejar el sistema asociado al Electrolizador. Para esto, se expresa cada flujo del sistema en función del flujo $n_{H_2}^1$ que sale del Electrolizador. El detalle de las expresiones de los flujos del sistema *Fuel Cell* se muestra en el AnexoA.1.

Los resultados principales del balance de masa del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* se muestran en la Tabla 6.1

Tabla 6.1: Resultados principales del balance de masa del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*.

Parámetro	Magnitud	Unidad
$n_{H_2}^1$	11,67	[mol/s]
$n_{H_2O}^7$	8,34	[mol/s]
A_{El}	536,31	[m ²]
A_{FC}	838,20	[m ²]

6.1.1.2. Balance de Energía

El balance de energía del sistema se realiza considerando los siguientes supuestos.

Los equipos de transferencia de calor funcionan de forma ideal y no se considera una pérdida energética, como es el caso de los Intercambiadores de Calor y los Calentadores. Por otro lado, se asume que no hay pérdidas de energía en los Tanques de Almacenamiento 1 y 2, es decir se consideran como un sistema aislado energéticamente, En el Tanque de Almacenamiento 3 existe una pérdida de calor dado que es necesario enfriar el flujo para obtener la temperatura deseada. La justificación de ambos supuestos se basa en que las mayores pérdidas energéticas están asociadas a los equipos electroquímicos como el Electrolizador y la *Fuel Cell*, por consiguiente las pérdidas energéticas de los equipos secundarios se consideran despreciables.

En el caso de los equipos donde no ocurre una transferencia de calor como los Tanque de Almacenamiento, se considera que la energía a la salida es igual que a la entrada. La energía del flujo se expresa como el flujo molar de la especie [mol/s] ponderado por la entalpía molar [kJ/kmol] de la misma especie.

$$n_i^e \cdot h_i^e = n_i^s \cdot h_i^s \quad (6.30)$$

En el caso de los Intercambiadores de Calor y el Mezclador, ocurre una transferencia energética entre los flujos involucrados en el equipo. Específicamente, los flujos que ingresan a una mayor temperatura son utilizados para calentar a los flujos que ingresan a una temperatura menor. El flujo de la especie i entra al Intercambiador de Calor desde la entrada e^1 , mientras que el flujo de la especie j entra al equipo desde la entrada e^2 , a su vez existen dos salidas de flujos de las especies correspondientes (Ecuación 6.42). En el Mezclador, existen dos flujos de entrada de una misma especie y sale un flujo de salida que corresponde a la mezcla de los flujos de entrada (Ecuación 6.41).

$$n_i^{e1} \cdot h_i^{e1} + n_j^{e2} \cdot h_j^{e2} = n_i^{s1} \cdot h_i^{s1} + n_j^{s2} \cdot h_j^{s2} \quad (6.31)$$

$$n_i^{e1} \cdot h_i^{e1} + n_i^{e2} \cdot h_i^{e2} = n_i^s \cdot h_i^s \quad (6.32)$$

En el caso de los Calentadores, estos requieren de energía externa para calentar los flujos, por tanto reciben un calor neto externo que se define como \dot{Q}_e . La expresión del balance de energía en el Calentador se define de la siguiente manera.

$$n_i^e \cdot h_i^e + \dot{Q}_e = n_i^s \cdot h_i^s \quad (6.33)$$

En el caso contrario, los Condensadores y el Disipador de Calor son equipos que disipan calor al exterior, por tanto existe una salida de calor neto hacia el ambiente.

$$n_i^e \cdot h_i^e = n_i^s \cdot h_i^s + \dot{Q}_e \quad (6.34)$$

En el Compresor, existe un trabajo neto en la entrada ya que se requiere de energía para comprimir los flujos. La expresión del balance energético en el Compresor se describe de la siguiente forma, donde \dot{W}_e corresponde a la entrada de trabajo del equipo.

$$n_i^e \cdot h_i^e + \dot{W}_e = n_i^s \cdot h_i^s \quad (6.35)$$

En el Electrolizador, el equipo recibe una entrada neta de trabajo desde el exterior y disipa una salida calor neto hacia el entorno. De esta forma, el balance de energía se define de la siguiente manera, donde el flujos de la especie i es el que reacciona y se obtiene como productos los flujos de las especies j y k .

$$\dot{W}_e + n_i^e \cdot h_i^e = \dot{Q}_s + n_k^s \cdot h_k^s + n_j^s \cdot h_j^s \quad (6.36)$$

En la *Fuel Cell* ocurre el caso contrario al Electrolizador, es decir el equipo recibe una entrada neta de calor desde el exterior y ejerce un trabajo neto sobre el exterior. Se define el balance de energía de la siguiente forma, donde los flujos de las especies i y j que entran al equipo y reaccionan para obtener como producto el flujo de la especie k en la salida.

$$\dot{Q}_e + n_i^e \cdot h_i^e + n_j^e \cdot h_j^e = \dot{W}_s + n_k^s \cdot h_k^s \quad (6.37)$$

Al comienzo del sistema, el Electrolizador recibe potencia eléctrica \dot{W}_{El} desde la red eléctrica y disipa calor al ambiente \dot{Q}_{El} . Se utiliza la Ecuación 6.36 y despejando se obtiene la siguiente expresión.

$$\dot{Q}_{El} = n_{H_2}^1 \cdot h_{H_2}^1 + n_{O_2}^{15} \cdot h_{O_2}^{15} - \dot{W}_{El} - n_{H_2O}^{14} \cdot h_{H_2O}^{14} \quad (6.38)$$

El Compresor 1 recibe potencia eléctrica \dot{W}_{C1} . Se utiliza la Ecuación 6.40 y despejando se obtiene la siguiente expresión.

$$\dot{W}_{C1} = n_{H_2}^1 \cdot h_{H_2}^1 - n_{H_2}^2 \cdot h_{H_2}^2 \quad (6.39)$$

El Compresor 2 recibe potencia eléctrica \dot{W}_{C2} . Se utiliza la Ecuación 6.40 y despejando se obtiene la siguiente expresión.

$$\dot{W}_{C2} = n_{O_2}^{15} \cdot h_{O_2}^{15} - n_{O_2}^{16} \cdot h_{O_2}^{16} \quad (6.40)$$

En el Mezclador, se considera que no hay transferencia energética con el exterior. Se utiliza la Ecuación 6.41 y despejando se obtiene la siguiente expresión.

$$h_{H_2}^4 = \frac{n_{H_2}^{11} \cdot h_{H_2}^{11} + n_{H_2}^3 \cdot h_{H_2}^3}{n_{H_2}^4} \quad (6.41)$$

En el Intercambiador de calor 1, no hay transferencia de calor con el exterior. El flujo caliente transfiere el calor íntegramente al flujo frío. Aplicando la Ecuación 6.42 y despajando se

obtiene la siguiente expresión.

$$h_{H_2}^5 = \frac{(n_{H_2}^7 \cdot h_{H_2}^7 + n_{H_2O}^7 \cdot h_{H_2O}^7) - (n_{H_2}^8 \cdot h_{H_2}^8 + n_{H_2O}^8 \cdot h_{H_2O}^8) + n_{H_2}^4 \cdot h_{H_2}^4}{n_{H_2}^5} \quad (6.42)$$

Dado que la temperatura de los flujos de entrada está definida por la operación de la *Fuel Cell* (800°C), se debe identificar el valor de la temperatura de los flujos de salida. El objetivo de la integración energética es aumentar la temperatura del flujo de H_2 que ingresará a la *Fuel Cell* de forma que su temperatura se acerque lo máximo posible a la temperatura de operación de la *Fuel Cell* y así ahorrar energía en el Calentador. A su vez, se deben respetar las leyes de la termodinámica, por tanto se debe definir la temperatura de salida del flujo 8 de manera que la temperatura del flujo 6 no sea superior a los 800°C, ya que si fuera así, el flujo frío saldría más caliente que el flujo caliente de entrada lo que no es posible termodinámicamente. Los datos termodinámicos de cada flujo del sistema se detalla en el Anexo A.1.

En el Intercambiador de calor 2, las expresiones y el procedimiento es análogo al Intercambiador de Calor 1. El flujo caliente transfiere el calor íntegramente al flujo frío. Aplicando la Ecuación 6.42 y despaizando se obtiene la siguiente expresión.

$$h_{O_2}^{18} = \frac{(n_{H_2}^8 \cdot h_{H_2}^8 + n_{H_2O}^8 \cdot h_{H_2O}^8) - (n_{H_2}^9 \cdot h_{H_2}^9 + n_{H_2O}^9 \cdot h_{H_2O}^9) + n_{O_2}^{17} \cdot h_{O_2}^{17}}{n_{O_2}^{18}} \quad (6.43)$$

En el Calentador 1 entra se recibe energía calórica de forma externa \dot{Q}_{cal1} . Se utiliza la Ecuación 6.33 y despejando, se obtiene.

$$\dot{Q}_{cal1} = n_{H_2}^6 \cdot h_{H_2}^6 - n_{H_2}^5 \cdot h_{H_2}^5 \quad (6.44)$$

El Calentador 2, se define de forma análoga y recibe energía calórica de forma externa \dot{Q}_{cal1} . Se utiliza la Ecuación 6.33 y despejando, se obtiene.

$$\dot{Q}_{cal2} = n_{O_2}^{19} \cdot h_{O_2}^{19} - n_{O_2}^{18} \cdot h_{O_2}^{18} \quad (6.45)$$

En el Disipador de calor, se disipa calor sin ejercer ni recibir trabajo del exterior \dot{Q}_{disp} . Se aplica la Ecuación 6.34 y despejando se obtiene.

$$\dot{Q}_{disp} = (n_{H_2}^{10} \cdot h_{H_2}^{10} + n_{H_2O}^{10} \cdot h_{H_2O}^{10}) - (n_{H_2}^9 \cdot h_{H_2}^9 + n_{H_2O}^9 \cdot h_{H_2O}^9) \quad (6.46)$$

En el Condensador, se disipa calor latente \dot{Q}_{cond} del H_2O con el objetivo de realizar un cambio de fase y dicha especie se separe del flujo de H_2 . Se aplica la Ecuación 6.34 y despejando, se obtiene.

$$\dot{Q}_{cond} = (n_{H_2}^{10} \cdot h_{H_2}^{10} + n_{H_2O}^{10} \cdot h_{H_2O}^{10}) - (n_{H_2}^{11} \cdot h_{H_2}^{11} + n_{H_2O}^{12} \cdot h_{H_2O}^{12}) \quad (6.47)$$

En el Tanque 3, se disipa calor \dot{Q}_{T3} para que el flujo a la entrada del Electrolizador esté en la temperatura de operación deseada. Utilizando la Ecuación 6.34 y despejando se obtiene.

$$\dot{Q}_{T3} = (n_{H_2O}^{13} \cdot h_{H_2O}^{13} - n_{H_2O}^{12} \cdot h_{H_2O}^{12}) \quad (6.48)$$

En la *Fuel Cell* se absorbe calor externamente \dot{Q}_{FC} y se ejerce trabajo sobre el entorno \dot{W}_{FC} .

Aplicando la Ecuación 6.37 y despejando, se obtiene.

$$\dot{Q}_{FC} = \dot{W}_{FC} + (n_{H_2}^7 \cdot h_{H_2}^7 + n_{H_2O}^7 \cdot h_{H_2O}^7) - n_{H_2}^6 \cdot h_{H_2}^6 - n_{O_2}^{19} \cdot h_{O_2}^{19} \quad (6.49)$$

Finalmente, se utiliza la Ley de Faraday en los equipos electroquímicos, planteada en la Ecuación 6.6, se obtienen las siguientes expresiones.

$$n_{H_2}^1 = \frac{1}{\alpha_e \cdot F} \cdot \frac{W_{El}}{U_{El}} \quad (6.50)$$

$$n_{H_2O}^7 = \frac{1}{\alpha_e \cdot F} \cdot \frac{W_{FC}}{U_{FC}} \quad (6.51)$$

En base a esta última relación, es posible cerrar el balance de energía y obtener todos los valores de calor y trabajo requeridos del sistema. con el fin de corroborar los cálculos, se realiza un balance de energía global del sistema, donde se debe cumplir que la energía total que entra al sistema es igual a la energía total que sale del sistema $E = S$. Para esto se consideran las entradas y salidas de energía únicamente. El balance global de energía se define de la siguiente manera.

$$E = (\dot{W}_{El} + \dot{W}_{C1} + \dot{W}_{C2}) \cdot t_{alm} + (\dot{Q}_{cal1} + \dot{Q}_{cal2} + \dot{Q}_{FC}) \cdot t_{sum} \quad (6.52)$$

$$S = (\dot{Q}_{El} + \dot{Q}_{T3}) \cdot t_{alm} + (\dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{disp} + \dot{W}_{FC}) \cdot t_{sum} \quad (6.53)$$

Además, se define el error del cálculo como la diferencia porcentual simple entre los valores de entrada y salida, y el valor máximo entre ellos.

$$Error = \frac{|E - S|}{\max\{E, S\}} \quad (6.54)$$

A partir del balance energético, se puede calcular el flujo de energía de entrada que requiere el sistema. Este flujo energético de entrada debe ser tal que el sistema de almacenamiento pueda suministrar 1 [MW] de potencia durante 14 horas. Es por esto que a mayor número de pérdidas energéticas del sistema de almacenamiento, mayor será la energía que se requerirá en la entrada para cumplir la unidad funcional.

Los resultados principales del balance de energía para el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* se resumen en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Resultados principales del balance de energía del sistema Hidrógeno-*Fuel Cell*.

Parámetro	Magnitud	Unidad
W_{El}	41.142.990	[W]
W_{FC}	13.515.007,3	[W]
η_{H2V}	32,85	%
Error	1,E-06	-

El detalle sobre los parámetros utilizados y los resultados obtenidos en el cálculo de los balances de energía del sistema se encuentran en el Anexo A.1.

6.1.2. Baterías de ion-Litio

6.1.2.1. Balance de Masa

En el caso del sistema de baterías no se requiere realizar un balance de masa, dado que a diferencia del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* no hay presencia de especies químicas ni flujos másicos en el sistema.

6.1.2.2. Balance de Energía

El balance energético que se realiza en el sistema de baterías de ion-Litio es de forma de energía eléctrica que entra y sale del sistema, con el objetivo de obtener el número de baterías que se necesitan para almacenar cierto flujo de energía. Puesto que la unidad funcional se rige por la energía que sale del sistema, es necesario dimensionar el sistema en base a la salida de energía que se requiere para cumplir con la unidad funcional.

En primer lugar, debemos conocer la potencia de salida del sistema de baterías, que se define como la potencial eléctrico por la corriente del sistema de baterías, se define de la siguiente forma[46][47].

$$\dot{E}_p = V_p \cdot I_p \quad (6.55)$$

Donde:

\dot{E}_p [W]: Potencia de salida del sistema de baterías.

V_p [V]: Potencial eléctrico del sistema de baterías, corresponde a la diferencia de potencial instantánea de la batería.

I_p [A]: Corriente del sistema de baterías, corresponde a la intensidad con la que se carga o descarga la batería.

Sumado a esto, debemos conocer el flujo de energía que almacenará el sistema durante el tiempo de almacenamiento definido, esto se calcula como el tiempo de descarga por la potencia de la descarga. La energía que debe almacenar el sistema de baterías queda definida de la siguiente forma[46][47].

$$E_p = \dot{E}_p \cdot t_{sum} \quad (6.56)$$

Donde:

E_p [W-h]= Energía que debe almacenar el sistema de baterías.

\dot{E}_p [W]= Potencia de salida del sistema de baterías.

t_{sum} [h] = Tiempo que el sistema de baterías estará suministrando energía a la red.

Por otro lado, la energía que almacena el sistema se puede determinar mediante la capacidad de descarga y el potencial eléctrico del sistema de baterías[47].

$$E_p = V_p \cdot D_c \quad (6.57)$$

Donde:

D_C [A h]: Capacidad de descarga de la batería, que corresponde a el flujo de energía que es capaz de suministrar la batería hasta que llega a la tensión mínima.

Es importante considerar que las baterías suelen dejar un margen de carga por motivos de

mantenimiento y seguridad del equipo. Este margen de carga se define como la Profundidad de descarga de la batería (*DoD*)[48], y su descripción se refiere al flujo de energía que se extrae de la batería expresada en porcentaje con respecto a la capacidad máxima de energía almacenable. Un valor usual de la *DoD* es un porcentaje cercano al 80 %, esto quiere decir que si una batería tiene una capacidad de almacenamiento de 100 [W-h], dispondrá de 80 [W-h] para ser usados y 20 [W-h] no se podrán extraer[48].

Si consideramos la *DoD*, la energía a almacenar debe ser mayor a la calculada teóricamente dado que debemos considerar el porcentaje de energía que no es posible obtener en la salida. Para calcular la energía real a almacenar se define la siguiente ecuación.

$$E_{p,real} = \frac{E_p}{DoD} \quad (6.58)$$

Donde:

$E_{p,real}$ [W-h]:Energía real de almacenamiento del sistema de baterías.

E_p [W-h]: Energía ideal de almacenamiento del sistema de baterías.

DoD: Profundidad de descarga del sistema de baterías.

Ahora, para conocer el número de baterías necesarias en el sistema, se debe conocer el potencial eléctrico nominal de cada batería. A partir del potencial eléctrico nominal y el potencial eléctrico del sistema es posible obtener el número de baterías mediante la siguiente expresión[48].

$$V_p = V_{nom} \cdot N_{bat} \quad (6.59)$$

Donde:

V_p [V]:Potencial eléctrico del sistema de baterías.

V_{nom} [V]:Potencial eléctrico nominal de la batería, que corresponde al potencial eléctrico que se ha previsto el funcionamiento de la batería.

N_{bat} : El número de baterías en el sistema.

Juntando las Ecuaciones 6.57,6.58, 6.59 y despejando, se obtiene la siguiente expresión que permite calcular el número de baterías necesarias en el sistema.

$$N_{bat} = \frac{E_{p,real}}{V_{nom} \cdot D_c} \quad (6.60)$$

Los resultados obtenidos del balance de energía del sistema de baterías se muestra en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Resultados principales del balance energético del sistema de baterías ion-Litio.

Parámetro	Magnitud	Unidad
$E_{p,real}$	18.094.660	[W]
E_p	14.475.728	[W]
<i>DoD</i>	0,8	-
V_{nom}	51	[V]
<i>Dc</i>	400	[A h]

η_{bat}	96	%
N°_{bat}	887	-

6.2. Cálculo de área de paneles solares

El Ministerio de Energía ha puesto a disposición del público, de forma gratuita, diferentes herramientas en línea y de tipo geográficas denominadas “Exploradores”, los cuales han sido diseñados como herramientas en línea destinadas al análisis de los recursos renovables que permiten, de manera gráfica, realizar una evaluación preliminar del potencial energético sobre cualquier sitio definido por el usuario [49].

Estas herramientas son el resultado de una estrecha y prolongada colaboración entre el Ministerio de Energía, la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) y el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, así como también de la Corporación Nacional Forestal y la Universidad Austral de Chile, la Dirección General de Aguas (DGA) y el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) [49].

Para el análisis del área de paneles solares en cada sistema de almacenamiento se utilizará el explorador solar y los datos de que este genere. El explorador solar permite calcular la generación de un sistema fotovoltaico en una ubicación específica. La información obtenida está basada en la modelación numérica de la transferencia de radiación solar en la atmósfera y datos satelitales de alta resolución.

El modelo de generación que se utiliza es el de operación básico para el cálculo de potencia que está basado en el modelo utilizado en la herramienta PVWatts (Dobos, 2014), desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL). Requiere pocos parámetros de entrada, por lo que sus resultados poseen un mayor grado de incertidumbre.

Entre los parámetros de entrada que se requieren se encuentran.

- Ubicación exacta de la planta fotovoltaica.
- Capacidad instalada de la planta.
- Tipo de arreglo de los paneles (horizontal o inclinado).
- Tipo de montaje (estructura aislada o paralela al techo).
- Capacidad del inversor.
- Eficiencia del inversor.
- Factor de pérdida de la planta.

El valor de los parámetros utilizados se encuentran en el Anexo B.1. La metodología para calcular el área de paneles solares consiste en los siguientes pasos.

1. Ingresar en los parámetros de entrada una capacidad instalada estimada.

2. Calcular la generación fotovoltaica diaria.
3. Verificar si la generación fotovoltaica diaria coincide con la energía de entrada que requiere el sistema para suministrar de manera interrumpida 1 [MW] durante [24 h] (Obtenida en la sección 6.1).
4. Si coincide, es posible calcular el área total de paneles solares.
5. Si no coincide, se debe repetir el proceso.

El modelo realiza una estimación del área de paneles solares mediante una relación con la capacidad instalada de la planta. La relación se muestra a continuación.

$$1[kW] \text{ Capacidad instalada} = 6,25[m^2] \text{ Área total de panel solar} \quad (6.61)$$

Los resultados obtenidos del modelo para cada caso de estudio se muestran en las Tablas 6.4.

Tabla 6.4: Resultados del modelo de generación fotovoltaica para el caso de estudio del sistema de baterías de baterías ion-Litio.

Planta Fotovoltaica con sistema de baterías		
Parámetro	Magnitud	Unidad
Generación eléctrica diaria	28.545,98	[kW-h]
Capacidad instalada	5,56	[MW]
Área de paneles solares	34.375	[m ²]

Tabla 6.5: Resultados del modelo de generación fotovoltaica para el caso de estudio del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*.

Planta Fotovoltaica con sistema de hidrógeno		
Parámetro	Magnitud	Unidad
Generación eléctrica diaria	51.964,59	[kW-h]
Capacidad instalada	10	[MW]
Área de paneles solares	62.500	[m ²]

6.3. Datos del sistema

En esta sección se definen los datos recopilados de bibliografía para realizar el análisis de inventario y obtener las materialidades de los equipos presentes en los sistemas a estudiar.

6.3.1. Hidrógeno Verde *Fuel Cell*

6.3.1.1. Instalación

La etapa de instalación de la planta fotovoltaica considera los paneles solares, el equipo inversor y el transformador. Los demás componentes de la planta solar se excluyen debido a que el foco del estudio es analizar el sistema de almacenamiento. Los datos de inventario de la

fabricación de paneles solares se recopilan del reporte *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems 2020* realizado por la Agencia Internacional de Energía (IEA) [51], en el Anexo B.2 se muestra el detalle de dichos datos. Sumado a esto, los datos de inventario recopilados están definidos para $1[m^2]$ de panel solar, por tanto, para calcular las entradas de material en función de la unidad funcional de los sistemas, se debe multiplicar cada dato de entrada por el área de paneles solares que requiere el sistema obtenido en la sección 6.2. En la Tabla 6.6 se muestran los valores para el inventario de los paneles solares en el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*².

Tabla 6.6: Datos de inventario de paneles solares para el sistema Hidrógeno *Fuel Cell* en la etapa de instalación.

Entrada	Magnitud	Unidad
Silicio	38.558,63	[kg/uF]
Aluminio	2.636,25	[kg/uF]
Cobre	6.451,88	[kg/uF]
Plomo	693,75	[kg/uF]
Plata	208,13	[kg/uF]
Estaño	832,50	[kg/uF]
Etilvinilacetato (EVA)	54.806,25	[kg/uF]
Película de fluoruro de polivinilo	7.006,88	[kg/uF]
Tereftalato de polietileno (PET)	21.714,38	[kg/uF]
Polietileno de alta densidad (HDPE)	1.456,88	[kg/uF]
Silicona	7.631,25	[kg/uF]
Vidrio Solar	531.481,88	[kg/uF]
Aleación de Aluminio	133.200,00	[kg/uF]

Los datos del inversor y el transformador están basados en datos recopilados en la planta Springerville de 4,6 MWp (Tucson, EE. UU.), escalados a 1 MW de potencia nominal[51][52]. En el Anexo B.2 se exponen en detalle dichos datos. En la Tabla 6.7 se muestran los valores para el inventario para el transformador e inversor, para obtener las entradas del sistema en función de la unidad funcional se multiplica el valor de cada dato por la potencia nominal de la planta fotovoltaica con el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*.

Tabla 6.7: Datos de inventario del inversor y el transformador para el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*

Entrada	Magnitud	Unidad
Aluminio	3.000	[kg/uF]
Cobre	16.560	[kg/uF]
Acero	67.560	[kg/uF]
Polipropileno	3.000	[kg/uF]

Los datos de inventario del equipo electrolizador alcalino se recopilan del estudio de G. Zhao *et al.* (International Journal of Hydrogen Energy, 2020). En este estudio, los datos

² uF hace referencia a la Unidad Funcional

recopilados están definidos para 1 [m^2 de celda], donde la celda consiste en el electrodo de hidrógeno, el electrodo de oxígeno, el electrolito, el marco y un interconector [53], en el Anexo B.3 se muestra en detalle los datos mencionados. Para calcular las entradas de material en función de la unidad funcional de los sistemas, se multiplica cada dato de inventario por los metros cuadrados de celda que requiere el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*. En la Tabla 6.8 se muestran los valores del inventario para el Electrolizador Alcalino en el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*[53].

Tabla 6.8: Datos de inventario del electrolizador alcalino para el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*.

Componente	Entrada	Magnitud	Unidad
Electrodo oxígeno	Níquel	951,35	[kg/uF]
Electrodo oxígeno	Sulfuro de Níquel	33,53	[kg/uF]
Electrodo hidrógeno	Níquel	951,35	[kg/uF]
Electrodo hidrógeno	Sulfuro de Níquel	33,53	[kg/uF]
Interconexión	Níquel	3.920,25	[kg/uF]
Electrolito	Polisulfona	51,13	[kg/uF]
Electrolito	Sulfuro de polifenileno	51,13	[kg/uF]
Marco	Polisulfona	1.629,46	[kg/uF]
Marco	Acero Inoxidable	1.951,32	[kg/uF]
Celda	Acero	6.202,66	[kg/uF]

Los datos de inventario del equipo *Fuel Cell* óxido sólido se recopilan del estudio M. Gandiglio *et al.* (Energies 2019). En este estudio los datos recopilados están definidos para 1 [m^2 de celda] [54], donde la celda consiste en el electrodo de hidrógeno, el electrodo de oxígeno, el electrolito, el marco y un interconector, además considera los insumos químicos que se utilizan en el proceso de fabricación del equipo como disolventes y aglutinantes. En la Tabla 6.9 se muestran los valores del inventario para la *Fuel Cell* SOFC en el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* [54].

Tabla 6.9: Datos de inventario del equipo *Fuel Cell* SOFC para el sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Componente	Entrada	Magnitud	Unidad
Cátodo	LSM ($La_{1-x}Sr_xCr_{0.5}Mn_{0.5}O_3$)	573,851	[kg/uF]
Cátodo	Circonia estabilizada con itria (YSZ)	133,184	[kg/uF]
Cátodo	Butiral de polivinilo (aglutinante)	43,501	[kg/uF]
Cátodo	Acetato de n-butilo 99,5 % (disolvente)	130,800	[kg/uF]
Cátodo	2-butoxietanol (disolvente)	16,387	[kg/uF]
Cátodo	Carbón negro	28,305	[kg/uF]
Cátodo	Methocel A4M (aglutinante)	28,901	[kg/uF]
Ánodo	Óxido de níquel	659,661	[kg/uF]
Ánodo	Circonia estabilizada con itria (YSZ)	133,184	[kg/uF]

Ánodo	Butiral de polivinilo (aglutinante)	43,501	[kg/uF]
Ánodo	Acetato de n-butilo 99,5 % (disolvente)	130,800	[kg/uF]
Ánodo	2-butoxietanol (disolvente)	16,387	[kg/uF]
Ánodo	Carbón negro	28,305	[kg/uF]
Ánodo	Methocel A4M (binder)	28,901	[kg/uF]
Electrolito	Circonia estabilizada con itria (YSZ)	133,184	[kg/uF]
Electrolito	Butiral de polivinilo (aglutinante)	43,501	[kg/uF]
Electrolito	Acetato de n-butilo 99,5 % (disolvente)	130,800	[kg/uF]
Electrolito	2-butoxietanol (disolvente)	16,387	[kg/uF]
Electrolito	Carbón negro	28,305	[kg/uF]
Electrolito	Methocel A4M (binder)	28,901	[kg/uF]
Marco	Acero Inoxidable	2.580,246	[kg/uF]
Marco	Óxido de aluminio	20,559	[kg/uF]
Interconector	Acero Inoxidable	2.580,246	[kg/uF]
Interconector	$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$	65,251	[kg/uF]
Celda	Acero	3.968,693	[kg/uF]

En el caso de los Tanques de Almacenamiento, se considera que están compuestos de acero inoxidable a excepción del Tanque 3 que se considera que está compuesto de acero. La referencia de la materialidad y la masa de los Tanques se obtiene de cotizaciones realizadas en internet [55][56][57]. El cálculo del número de tanques que requiere el sistema de Hidrógeno se especifica en el Anexo B.3. En la Tabla B.7 se muestra los valores de inventario para los Tanques de Almacenamiento del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Tabla 6.10: Datos de inventario de los Tanque de Almacenamiento del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Componente	Entrada	Magnitud	Unidad
Tanque 1	Acero Inoxidable	27.323,95	[kg/uF]
Tanque 2	Acero Inoxidable	54.811,64	[kg/uF]
Tanque 3	Acero	75,87	[kg/uF]

En el caso de los equipos secundarios se realizan consideraciones similares al caso de los equipos de almacenamiento. En primer lugar se asumen que todos los equipos secundarios están compuestos de acero a modo de simplificar las materialidades, debido a que es el material más presente en los equipos. El disipador de calor y el condensador consideran un porcentaje de cobre además de acero.

La referencia de la materialidad y el flujo másico de los equipos secundarios se obtienen de cotizaciones realizadas en internet que se especifican en el Anexo B.3 junto a las dimensiones del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*. En la Tabla 6.11 se muestra el inventario de los equipos secundarios.

Tabla 6.11: Datos de inventario de los equipos secundarios del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Componente	Entrada	Magnitud	Unidad
Compresor 1	Acero	1.200,00	[kg/uF]
Compresor 2	Acero	350,00	[kg/uF]
Intercambiador de calor 1	Acero	450,00	[kg/uF]
Intercambiador de calor 2	Acero	450,00	[kg/uF]
Condensador	Acero	385,44	[kg/uF]
Condensador	Cobre	55,06	[kg/uF]
Disipador de Calor	Acero	16,13	[kg/uF]
Disipador de Calor	Cobre	8,07	[kg/uF]

Por otro lado, la etapa de instalación contempla el transporte de los equipos del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*, específicamente se considera la importación de los paneles solares, el balance del sistema, el electrolizador alcalino, la *Fuel Cell*, las tanques de almacenamiento y los equipos secundarios. No se considera el transporte terrestre ya que en este caso tiene menor incidencia que el transporte marítimo de importación en cuanto a distancia e impacto ambiental. La distancia de transporte se calcula mediante la herramienta *Distance & Time* de la página web *SeaRates* [58], dicha herramienta permite calcular rutas de buque de cargas desde distintos puertos marítimos del mundo. En este caso, se calcula la distancia desde el puerto marítimo de Shangai en China hasta el puerto de San Antonio en Chile. En la Tabla 6.12 se muestra la distancia del transporte marítimo y la masa de la carga de importación de los equipos.

Tabla 6.12: Datos de inventario transporte de importación equipos de sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Componente	Transporte	Masa [kg]	Distancia [km]
Equipos H2V	Marítimo	111.773,92	18.965,60
Paneles Solares	Marítimo	806.678,63	18.965,60
Balance de Sistema	Marítimo	90.120,00	18.965,60

6.3.1.2. Mantención

La etapa de mantención contempla los reemplazos de los equipos del sistema según su vida útil durante el horizonte temporal de 25 años, sumado a esto considera el transporte de importación de dichos equipos. Se asume que los equipos secundarios del sistema (a excepción de los tanques de almacenamiento), tienen una vida útil de 15 años, estimando un promedio entre la vida útil de todos los equipos secundarios que varía desde los 10 a los 20 años. En la Tabla 6.13 se describe la vida útil de cada equipo presente en el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* y el número de reemplazos que estos conllevan durante los 25 años.

Tabla 6.13: Datos de inventario de mantención de equipos secundarios del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Componente	Vida útil [años]	Reemplazos
Compresor 1	15	1
Compresor 2	15	1
Tanque 1	25	0
Tanque 2	25	0
Tanque 3	25	0
Intercambiador de calor 1	15	1
Intercambiador de calor 2	15	1
Condensador	15	1
Disipador de Calor	15	1

También, se considera que los paneles solares poseen una vida útil de 25 años por lo que en condiciones óptimas no deberían reemplazarse. Sin embargo, en la realidad existe un porcentaje de paneles solares que se deterioran anualmente, este porcentaje puede implicar que un 0,5 % a 3 % de los paneles solares desecharse al año dependiendo de las condiciones climáticas o de los procesos de mantenimiento [59]. En base a lo anterior, se asume que se debe reemplazar anualmente un 1 % de los paneles solares, para el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*, se traduce en que se reemplazan 322 paneles solares al año [59]. En cuanto al balance del sistema, se asume que la vida útil de los equipos electrónicos es de 15 años, por lo tanto deben ser reemplazados 1 vez durante el horizonte temporal [60].

Finalmente, la vida útil de los equipos electroquímicos generalmente se define en horas de funcionamiento. Se recopila información sobre las horas útiles del electrolizador alcalino y la *Fuel Cell*, luego se calcula el número de horas que debe trabajar el equipo durante el horizonte temporal y el número de años operativos que tiene cada equipo. En la Tabla 6.14 se muestran los detalles de la mantención de los equipos electroquímicos.

Tabla 6.14: Datos de inventario de mantención de los equipos electroquímicos el sistema Hidrógeno *Fuel Cell*

Componente	Vida útil [hr]	Vida útil [años]	Reemplazo	Referencia
Electrolizador	85.000	25,29	0	[53]
<i>Fuel Cell</i>	40.000	7,83	4	[54]

6.3.1.3. Desmantelamiento

En la etapa de desmantelamiento, se asume el fin de vida de todos los equipos presentes en el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*, incluyendo los paneles solares y el balance del sistema. La disposición final de los equipos es chatarra electrónica en relleno sanitario y no se contempla una reutilización de los equipos, ni reciclaje de las materialidades. Sin embargo, se considera que las alternativas de disposición final que implican una integración de los flujos al sistema (como reciclaje o reutilización) son importantes de analizar aunque no es el objetivo de este estudio.

6.3.2. Baterías ion-Litio

6.3.2.1. Instalación

En la etapa de instalación se utilizan los mismos supuestos y datos especificados en el caso del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*, desarrollados en la sección 6.3.1.1

En la Tabla 6.15 se muestran los valores para el inventario de los paneles solares en el sistema de Baterías ion-Litio.

Tabla 6.15: Datos de inventario de paneles solares para el sistema de baterías ion-Litio en la etapa de instalación.

Entrada	Magnitud	Unidad
Silicio	21.207,24	[kg/uF]
Aluminio	1.449,94	[kg/uF]
Cobre	3.548,53	[kg/uF]
Plomo	381,56	[kg/uF]
Plata	114,47	[kg/uF]
Estaño	457,88	[kg/uF]
Etilvinilacetato (EVA)	30.143,44	[kg/uF]
Película de fluoruro de polivinilo	3.853,78	[kg/uF]
Tereftalato de polietileno (PET)	11.942,91	[kg/uF]
Polietileno de alta densidad (HDPE)	801,28	[kg/uF]
Silicona	4.197,19	[kg/uF]
Vidrio Solar	292.315,03	[kg/uF]
Aleación de Aluminio	73.260,00	[kg/uF]

En la Tabla 6.16 se muestran los valores para el inventario para el transformador e inversor, para obtener las entradas del sistema en función de la unidad funcional se multiplica el valor de cada dato por la potencia nominal de la planta fotovoltaica con el sistema de baterías ion-Litio.

Tabla 6.16: Datos de inventario de inversor y transformador para el sistema de baterías ion-Litio en la etapa de instalación.

Entrada	Magnitud	Unidad
Aluminio	1.668,00	[kg/uF]
Cobre	9.207,36	[kg/uF]
Acero	37.563,36	[kg/uF]
Polipropileno	1.668,00	[kg/uF]

Los datos de inventario de las baterías de ion-Litio se recopilan del estudio Y. Liang *et al* (Resources, Conservation and Recycling 117 (2017) 285–293). En dicho estudio, los datos recopilados de las entradas de materiales para la fabricación de las baterías están definidos en porcentajes de masa con respecto a la masa total de una batería de ion litio ferrosfosfato. Para

calcular las entradas de material en función de la unidad funcional, se calcula la masa total de baterías de litio que requiere el sistema a partir del número total de baterías obtenida en el balance de energía, y la masa de una batería unitaria. En la Tabla 6.17 se muestran los valores del inventario para las baterías de ion-Litio. En el Anexo B.4 se detalla los datos de inventario recopilados.

Tabla 6.17: Datos de inventario de baterías de ion-Litio para la etapa de instalación.

Componente	Entrada	Magnitud	Unidad
Cátodo	Litio ferfosfato (LiFePO_4)	48.789,65	[kg/uF]
Cátodo	Carbón negro	9.778,74	[kg/uF]
Cátodo	Aluminio	205,97	[kg/uF]
Ánodo	Grafito	48.789,65	[kg/uF]
Ánodo	Carbón negro	9.778,74	[kg/uF]
Ánodo	Aluminio	720,36	[kg/uF]
Electrolito	Carbonato de etileno	2.886,77	[kg/uF]
Electrolito	Carbonato de etilmetilo(EMC)	7.206,26	[kg/uF]
Electrolito	Litio hexafluorofosfato (LiPF_6)	15.538,94	[kg/uF]
Separador	Membrana de polietileno	72,04	[kg/uF]
Marco	Acero Inoxidable	15.891,65	[kg/uF]

En la Tabla 6.18 se muestran se muestra la distancia del transporte marítimo y la masa de la carga de importación de los equipos.

Tabla 6.18: Datos de inventario transporte de importación equipos de sistema Baterías ion-Litio.

Componente	Transporte	Masa [kg]	Distancia [km]
Baterías ion-Litio	Marítimo	159.658,76	18.965,60
Paneles Solares	Marítimo	443.673,24	18.965,60
Balance de Sistema	Marítimo	50.106,72	18.965,60

6.3.2.2. Mantención

En cuanto a la mantención de los paneles solares y balance del sistema, se utilizan los mismos supuestos que se especifican en el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* en la sección 6.3.1.2. Es decir, los equipos del balance del sistema se reemplazan 1 vez durante el horizonte temporal del estudio. Sumado a esto, se reemplaza anualmente el 1% de los paneles solares, específicamente en el caso del sistema de baterías ion-litio, se reemplazan 7 paneles solares al año.

La vida útil de las baterías de litio se define en función de el número de ciclos de descarga. Las baterías ion-Litio utilizadas en electromovilidad tienen una vida útil de aproximadamente 1.500 ciclos de descarga [62]. En el caso de las baterías utilizadas en sistemas conectados a la red, el número de ciclos de descarga aumenta dado que poseen una menor densidad energética

pero un mayor rango de estado de carga. Por tanto, el número de ciclos de carga puede variar entre los 2.000 y 4.000, se asume que las baterías de este sistema poseen un valor promedio de 3.000 ciclos de descarga [63], dado que el sistema requiere de 9.125 ciclos de descarga durante el horizonte temporal, se deben reemplazar las baterías al menos 3 veces. En la Tabla 6.19 se especifica la vida útil de las baterías de litio y el número de reemplazos que se realizan en el horizonte temporal en función de los ciclos de descarga.

Tabla 6.19: Datos de vida útil y el número de reemplazo de baterías ion-Litio en etapa de mantención.

Equipo	Ciclos	Ciclos t	Reemplazo	Referencia
Baterías LFP	3.000	9.125	3,04	[63]

6.3.2.3. Desmantelamiento

En la etapa de desmantelamiento se utilizan los mismos supuestos especificados en el sistema de Hidrógeno Fuel - Cell, desarrollado en la sección 6.3.1.3.

Capítulo 7

Evaluación de Potencial de Calentamiento Global

En este capítulo se presentan los factores de emisión y los resultados correspondientes al Análisis de Ciclo de Vida, bajo la categoría de impacto ambiental de Potencial de Calentamiento Global para el caso de sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías de ion-Litio en función de los datos que se exponen en el capítulo anterior. Además, se contrastan los resultados obtenidos para cada caso y se identifican las etapas críticas. En el Anexo D se presentan ejemplos de cálculos y resultados específicos obtenidos para cada caso.

7.1. Factores de emisión

Puesto que algunos factores de emisión de ciertos materiales presentes en el inventario de fabricación de los equipos no se encuentran en *Ecoinvent*, se estimaron en base a factores de emisión de materiales que se componen química y físicamente similar a los datos faltantes. Las aproximaciones se describen a continuación.

- Se estima el factor de emisión del material manganitas de lantano dopadas con estroncio (LSM: $La_{1-x}Sr_xCr_{0.5}Mn_{0.5}O_3$) utilizando el factor de emisión del compuesto óxido de lantano (La_2O_3), debido a que poseen predominantemente lantano y oxígeno presentan una composición química similar.
- Se estima el factor de emisión del compuesto circonia estabilizada con itria (YSZ) en base factor de emisión del dióxido de circonio (ZrO_2), dado que el YSZ es una estructura cristalina cúbica del dióxido de circonio que se estabiliza a temperatura ambiente mediante la adición de óxido de itrio.
- Se estima el factor de emisión del litio ferrofosfato ($LiFePO_4$) a partir de una ponderación de los factores de emisión del litio, el hierro y el fosfato. El detalle del cálculo de la estimación del factor de emisión se especifica en el Anexo C.

En la Tabla 7.1 se presentan los factores de emisión de los materiales utilizados en la fabricación de los equipos especificados en el capítulo anterior.

Tabla 7.1: Factores de emisión de la fabricación de equipos recopilados de la base de datos *Ecoinvent*-

Componente	GWP [kgCO₂eq]	Fuente
2-butoxietanol	1,228	<i>Ecoinvent</i>
Acero	2,479	<i>Ecoinvent</i>
Acero Inoxidable	4,397	<i>Ecoinvent</i>
Acetato de n-butilo	3,677	<i>Ecoinvent</i>
Aleación de Aluminio	7,773	<i>Ecoinvent</i>
Aluminio	4,600	<i>Ecoinvent</i>
Butiral de polivinilo	2,150	<i>Ecoinvent</i>
Carbón negro	2,579	<i>Ecoinvent</i>
Carbonato de etileno	1,523	<i>Ecoinvent</i>
Carbonato de etilmetilo	1,523	<i>Ecoinvent</i>
Cobre	5,444	<i>Ecoinvent</i>
Estaño	21,599	<i>Ecoinvent</i>
Etilvinilacetato (EVA)	2,182	<i>Ecoinvent</i>
Grafito	0,076	<i>Ecoinvent</i>
HDPE	2,012	<i>Ecoinvent</i>
Litio ferfosfato (LiFePO ₄)	9,129	Estimación
Litio hexafluorofosfato (LiPF ₆)	28,884	<i>Ecoinvent</i>
LSM ($La_{1-x}Sr_xCr_{0.5}Mn_{0.5}O_3$)	22,120	Estimación
Membrana de polietileno	9,455	<i>Ecoinvent</i>
Methocel A4M	6,905	<i>Ecoinvent</i>
Mn _{1.5} Co _{1.5} O ₄	0,478	<i>Ecoinvent</i>
Níquel	6,982	<i>Ecoinvent</i>
Óxido de aluminio	2,014	<i>Ecoinvent</i>
Óxido de níquel	6,982	<i>Ecoinvent</i>
Fluoruro de polivinilo	21,657	<i>Ecoinvent</i>
PET	2,929	<i>Ecoinvent</i>
Plata	565,505	<i>Ecoinvent</i>
Plomo	1,200	<i>Ecoinvent</i>
Polipropileno	0,377	<i>Ecoinvent</i>
Polisulfona	8,521	<i>Ecoinvent</i>
Silicio	52,290	<i>Ecoinvent</i>
Silicona	3,253	<i>Ecoinvent</i>
Sulfuro de Níquel	2,885	<i>Ecoinvent</i>
Sulfuro de polifenileno	6,790	<i>Ecoinvent</i>
Vidrio Solar	1,099	<i>Ecoinvent</i>
YSZ	4,948	Estimación

En la Tabla 7.2 se presentan los factores de emisión del transporte de importación en buque

de carga por medio marítimo, obtenido de la base de datos *DEFRA* (UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting. Department for Business, Energy Industrial Strategy) publicados en la versión disponible de 2021 [64].

Tabla 7.2: Factor de emisión de potencial de calentamiento global para el transporte marítimo en buque de carga

Transporte	Actividad	Tipo	Tamaño	Unidad	GWP [$kgCO_2eq$]
Marítimo	Buque de carga	Mercante	Promedio	[ton.km]	0,016142

En la Tabla 7.3 se presenta el factor de emisión obtenido de *Ecoinvent*, utilizado para la etapa de desmantelamiento, donde se considera el fin de vida de los equipos electrónicos.

Tabla 7.3: Factor de emisión utilizado para el fin de vida de los equipos en la etapa de desmantelamiento.

Actividad	Descripción	GWP [$kgCO_2eq$]
Desecho	Chatarra electrónica	0,056

7.2. Cuantificación de Impacto

El cálculo del Potencial de Calentamiento Global sigue los pasos presentados en el Anexo D. Los resultados obtenidos para el caso de estudio se presentan en la Figura 7.1 donde se contrastan con las emisiones totales para el sistema Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías ion-Litio.

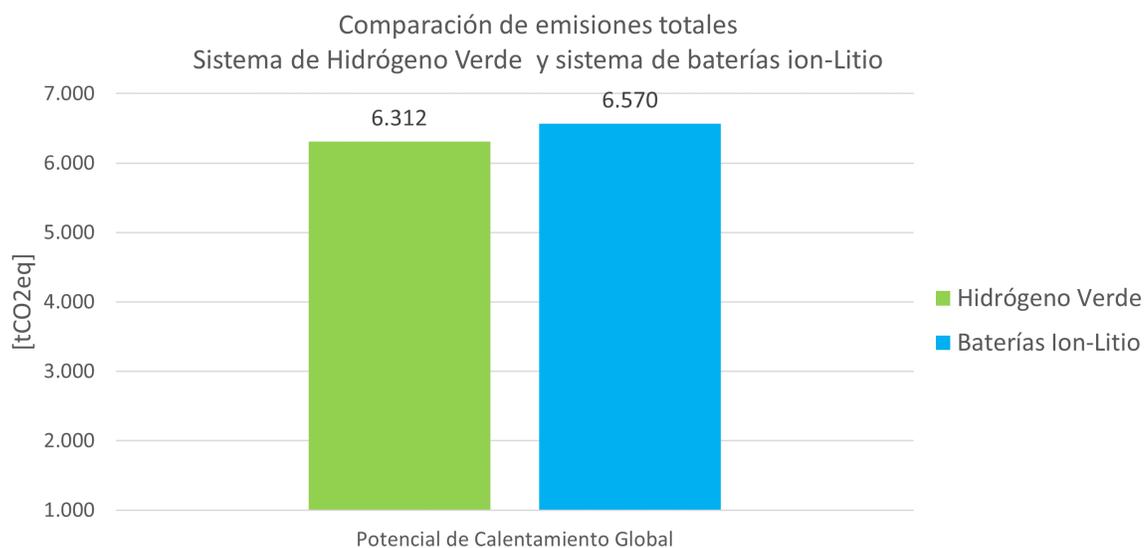


Figura 7.1: Comparación de resultados globales de Potencial de Calentamiento Global del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías ion-Litio.

El Potencial de Calentamiento Global para el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* es menor al sistema de Baterías ion-Litio. A modo de comparación, ambos casos presentan valores

bastante similares con una diferencia de un 3,94 %. Considerando que los resultados obtenidos están sujetos a un porcentaje de error, debido a los datos de inventario recopilados y la estimación de los factores de emisión, se puede concluir que los resultados de esta categoría de impacto no son concluyentes.

En la Figura 7.2 se observa las emisiones de los casos de estudio por macroetapa del ciclo de vida: Instalación, Mantenimiento y Desmantelamiento. En base a lo observado, se evidencia que en la macroetapa de Instalación se presenta un mayor Potencial de Calentamiento Global en ambos casos de estudio.

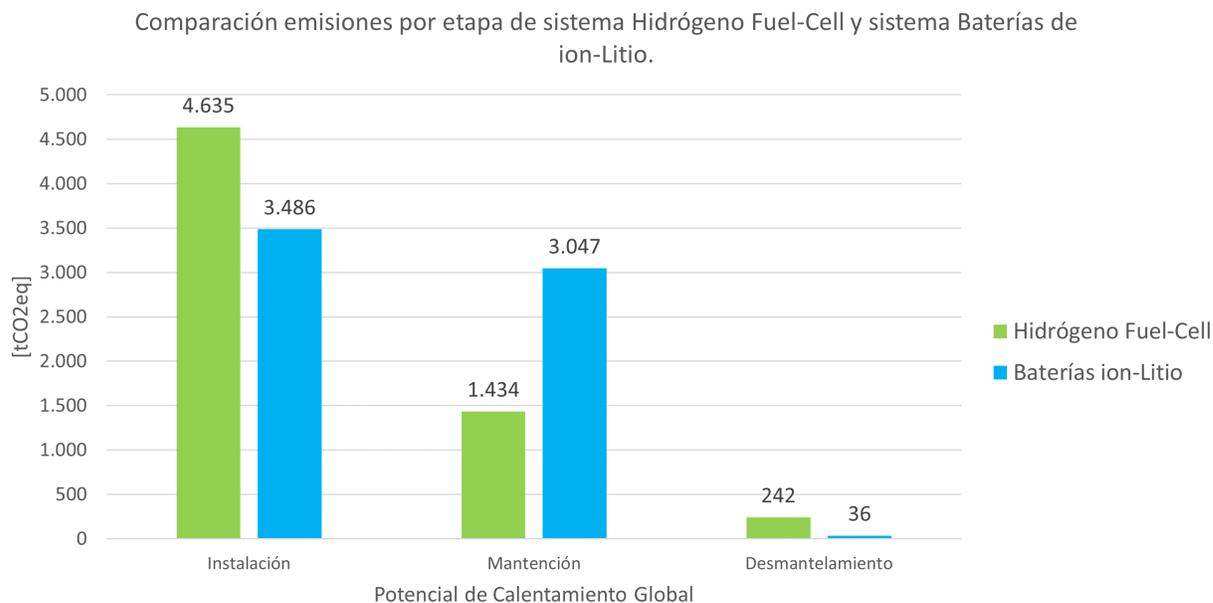


Figura 7.2: Comparación de resultados de Potencial de Calentamiento Global por etapa de ciclo de vida del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías ion-Litio.

En la etapa de Instalación, el sistema Hidrógeno *Fuel Cell* presenta una mayor emisión de GEI, con una diferencia de un 24,78 %, consecuencia de la fabricación de un gran número de equipos que contiene el sistema y de poseer un mayor número de paneles solares que en el caso del sistema de Baterías de ion-Litio. No obstante, en la etapa de Mantenimiento el panorama se revierte, donde el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* presenta un 52,92 % menos de emisiones, dado que las baterías de ion-Litio poseen una vida útil más corta que el promedio de los equipos presentes en el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*, por consiguiente el sistema de Baterías de ion-Litio dispone de un mayor reemplazo de equipos, lo que implica a su vez una mayor emisión de GEI por la fabricación de las baterías. Con respecto a la etapa de desmantelamiento, en ambos casos es la macroetapa menos incidente en cuanto al Potencial de Calentamiento Global, sin embargo en sistema Hidrógeno *Fuel Cell* presenta una emisión mayor que el sistema de Baterías en consecuencia del número y masa de equipos que contiene el sistema, al presentar una mayor masa se potencia la problemática de la disposición final de los equipos generando un mayor impacto.

En la Figura 7.3 se observa que la etapa con mayor Potencial de Calentamiento Global en

la macroetapa de Instalación es la fabricación de paneles solares. Para el sistema de baterías de ion-Litio, la fabricación de paneles solares es responsable de un 62,4 % de las emisiones de GEI en la etapa de Instalación, mientras que para el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* corresponde a un 83,64 %. La diferencia se debe a que el Sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* es menos eficiente energéticamente que el sistema de Baterías de ion-Litio, por lo tanto necesita más paneles solares para lograr almacenar y suministrar el mismo flujo de energía que el sistema de baterías. Gran parte de las emisiones producidas por la fabricación de los paneles solares son consecuencia de la obtención y posterior refinación del silicio para obtener la pureza que requiere el silicio de grado solar[65].

Por otra parte, la fabricación de las baterías de ion-Litio implica una mayor emisión de GEI en comparación a la fabricación de los equipos del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*, la diferencia es de un 62,73 %. Los compuestos de litio ($LiFePO_4$ y $LiPF_6$) son responsables de un 84,47 % de las emisiones de carbono en el proceso de fabricación de la batería, ya que corresponden a un porcentaje importante de la masa de la baterías y los procesos de extracción de litio requieren de un alto consumo energético generando emisiones de carbono [66]. En cuanto al transporte de instalación, el impacto es mayor en el caso del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* debido a que implica una importación de mayor masa. En el Anexo D se detalla los resultados de la distribución de emisión en la etapa de Instalación para cada uno de los casos de estudio.

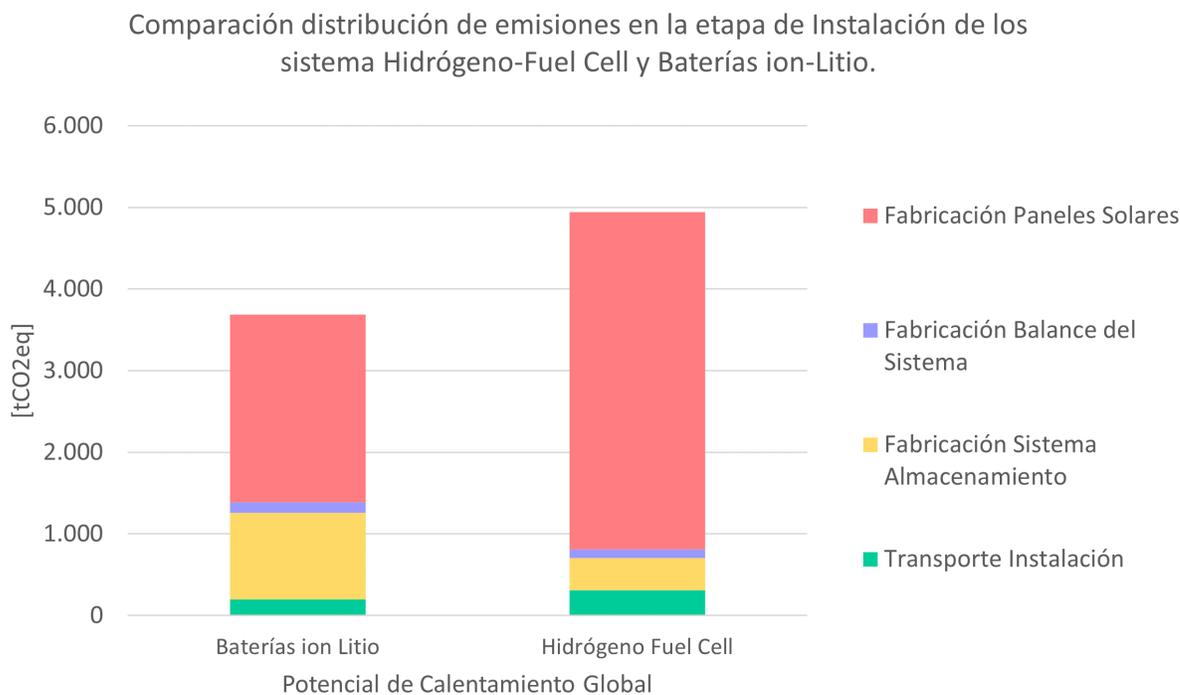


Figura 7.3: Distribución de emisiones de Potencial de Calentamiento Global en la etapa de Instalación del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías ion-Litio.

En la Figura 7.4 se observa el desglose de las emisiones de Potencial de Calentamiento Global en la etapa de Mantenimiento. En primer lugar, se observa que el reemplazo de las baterías de ion-Litio marca una diferencia importante respecto a las emisiones del sistema

Hidrógeno *Fuel Cell*, como se menciona anteriormente la razón de esta diferencia se debe a que las baterías de ion-Litio poseen un tiempo de vida útil menor que los equipos utilizados en el sistema de hidrógeno. Por otra parte, la reposición de los paneles solares posee un impacto mayor para el sistema Hidrógeno *Fuel Cell*. En el Anexo D se detallan los resultados del Potencial de Calentamiento Global en la etapa de Mantenimiento para cada uno de los casos de estudio.

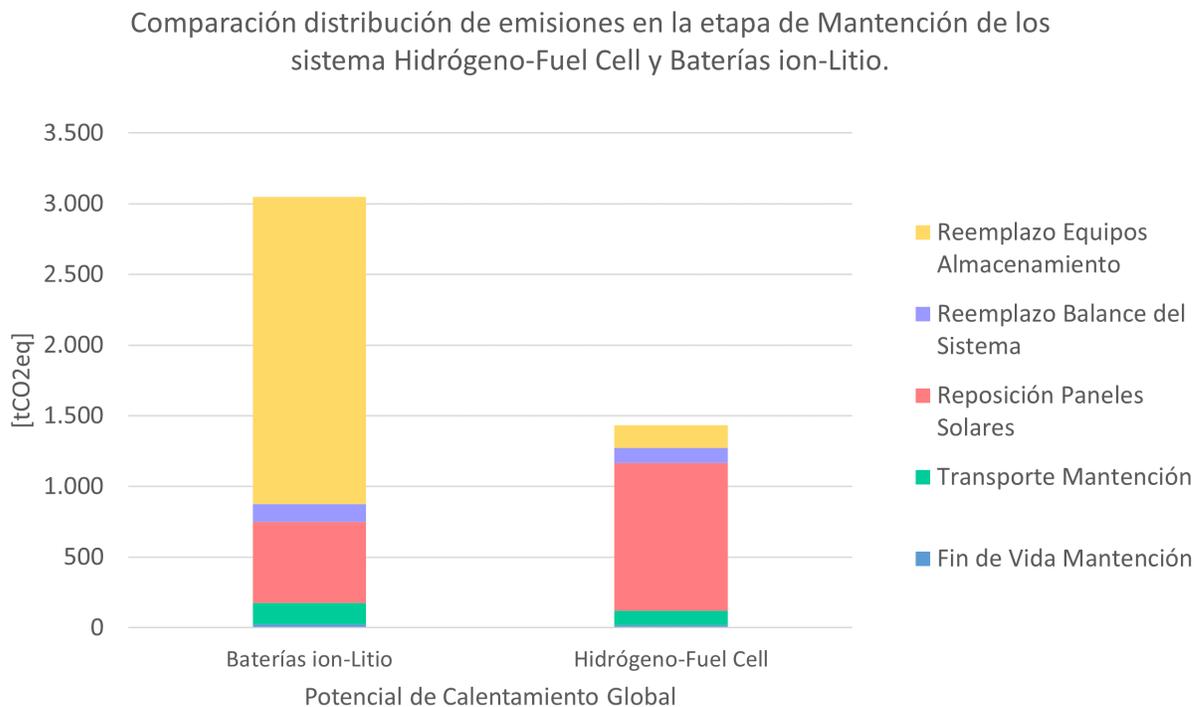


Figura 7.4: Distribución de emisiones de Potencial de Calentamiento Global en la etapa de Mantenimiento del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías ion-Litio.

Finalmente, las emisiones de CO_2eq de la etapa de Desmantelamiento son consecuencia de la disposición final de los equipos, donde se consideran chatarra electrónica. El detalle de las emisiones se presenta en el Anexo D.

7.3. Análisis de Sensibilidad

A partir de los resultados obtenidos, el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* presenta un Potencial de Calentamiento Global menor al sistema de Baterías ion-Litio, sin embargo los resultados se acercan bastante siendo poco concluyentes dado que se diferencian solo de un 3,94 %. Por tanto, se realiza el análisis de sensibilidad en torno a la disminución de la eficiencia del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* para identificar el *punto crítico*, es decir el escenario de eficiencia del sistema donde el Potencial de Calentamiento Global se iguala al sistema de Baterías ion-Litio. El *punto crítico* de eficiencia es 30,8 %, en este punto ambos casos de estudio poseen el mismo impacto ambiental según esta categoría.

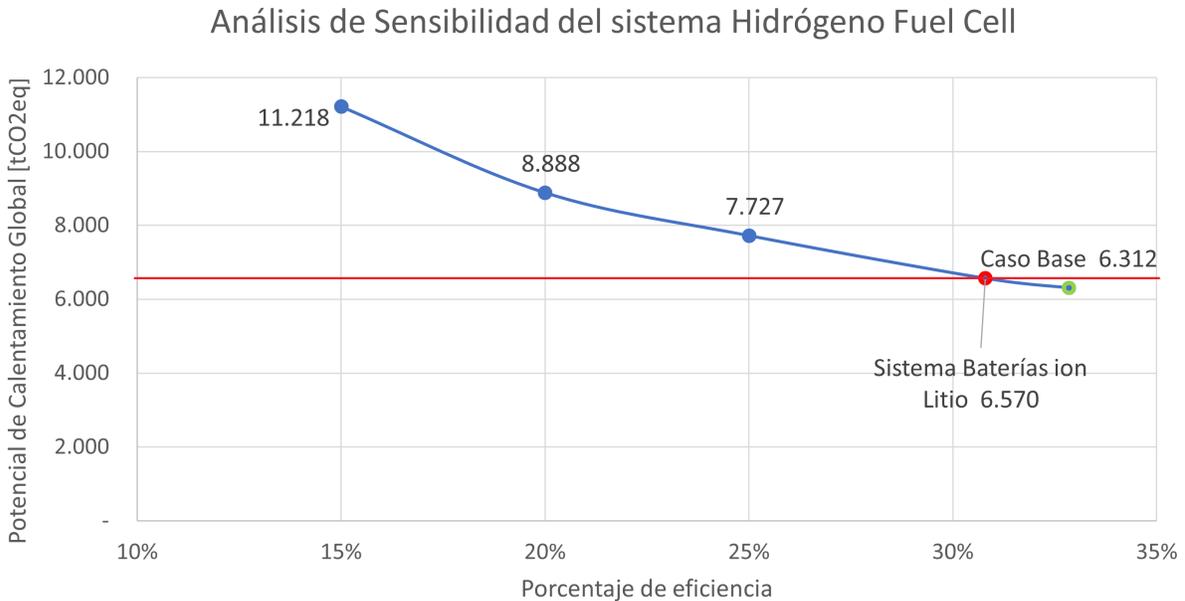


Figura 7.5: Análisis de sensibilidad sobre el Potencial de Calentamiento Global en el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* en función de la eficiencia del sistema.

En cuanto al sistema de Baterías ion-Litio la Figura 7.6 se observa el análisis de sensibilidad de los resultados del Potencial de Calentamiento Global en función del número de ciclos de descarga. Se evidencia que esta categoría de impacto es sensible al número de de baterías ion-litio que se requieren durante el ciclo de vida del sistema. Al aumentar los ciclos de descarga a 5.000, las emisiones de GEI disminuyen en un 17,7 %, mientras que al aumentar a 10.000 ciclos, las emisiones disminuyen en un 34,81 %. Esto implica que la fabricación de las baterías ion-Litio son causantes de gran parte de la huella de carbono del sistema.

Análisis de Sensibilidad del sistema Baterías ion-Litio

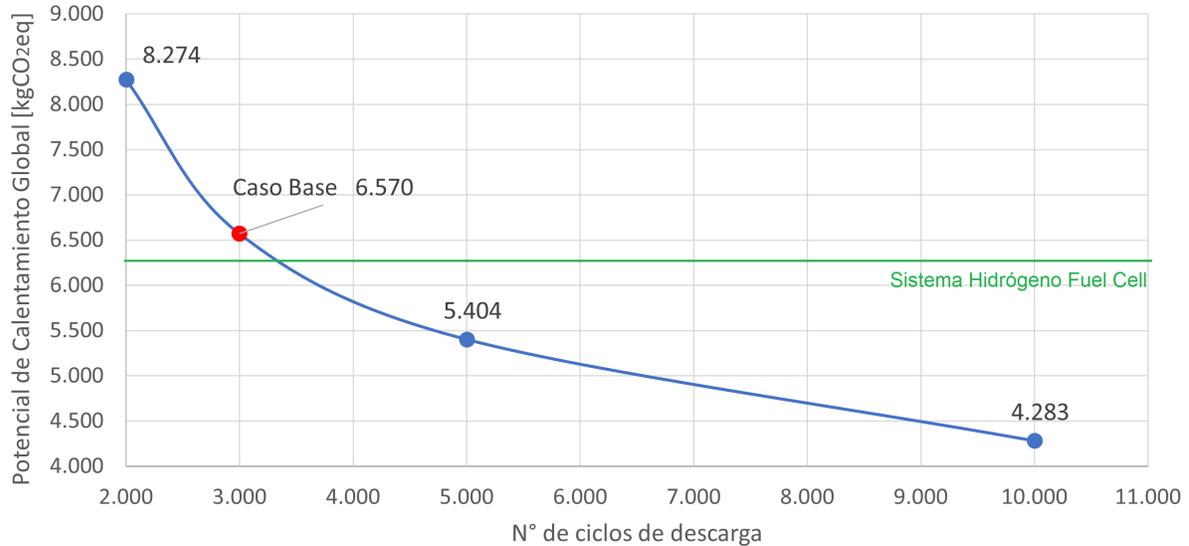


Figura 7.6: Análisis de sensibilidad sobre el Potencial de Calentamiento Global en el sistema de Baterías de ion-Litio en función del número de ciclos de descarga.

7.4. Discusión

Los resultados obtenidos en la Figura 7.1 muestran que los sistemas de estudio presentan un valor similar del Potencial de Calentamiento Global, donde el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* presenta un 3,94% menos de emisiones de GEI. En ambos casos, el mayor porcentaje de emisión se le atribuye a la fabricación de paneles solares, lo cual era esperable dado que es la etapa que presenta mayor Potencial de Calentamiento Global en los Análisis de Ciclo de Vida de plantas fotovoltaicas [67][68]. Una de las principales causas de esto, es la elevada extracción de silicio en consecuencia de que es uno de los componentes principales de la célula solar. El silicio es uno de los elementos más abundante en nuestro planeta, pero no se encuentra aislado sino combinado con oxígeno, por lo cual tiene que pasar por una serie de procesos de purificación para obtener el producto deseado, lo que implica una alta demanda energética y se traduce en una alta emisión de GEI[65].

En la Figura 7.2 se observa que el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* presenta una mayor emisión en la etapa de fabricación de los paneles solares que el sistema de Baterías, ya que el primero posee una menor eficiencia de almacenamiento energético, por tanto requiere de un mayor área de paneles solares para obtener un mayor ingreso de energía al sistema de almacenamiento, específicamente requiere de un 81% más de área de panel solar que el sistema de Baterías ion-Litio. La baja eficiencia del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* se debe a la pérdida que ocurre al transformar la energía eléctrica en energía química y luego transformar la energía química en energía eléctrica. Considerando que los equipos electroquímicos (electrolizador y *Fuel Cell*) poseen cerca de un 70% de eficiencia, el sistema de almacenamiento tiene una pérdida cercana al 30% en el equipo electrolizador, y posteriormente se pierde alrededor de un 30% en la *Fuel Cell*, por lo cual el sistema presenta una eficiencia global

de 32,8%. Esto tiene sentido ya que acorde a lo revisado en bibliografía, los sistemas de almacenamiento Hidrógeno *Fuel Cell* presentan una eficiencia global entre 25% a 35%. Es importante mencionar, que al utilizar el supuesto de que los equipos secundarios funcionan de forma ideal, se puede estar sobre estimando la eficiencia global del sistema obteniendo un valor más alto que el real.

A pesar de que el sistema de Baterías ion-Litio presenta una menor área de paneles solares, este requiere reemplazar 3 veces el *pack* de baterías durante el horizonte temporal de la planta fotovoltaica. La causa de esto es que las baterías ion-Litio poseen una vida útil menor que los equipos electroquímicos del sistema de hidrógeno. Por lo tanto lo anterior genera un *trade off*, obteniéndose un Potencial de Calentamiento Global similar en ambos sistemas. En base a los resultados obtenidos, la extracción y procesamiento del litio son las principales responsables de las emisiones de carbono en el proceso de fabricación de baterías de ion-litio, dado el alto consumo energético en los procesos de extracción, este resultado coincide con lo revisado en bibliografía de Análisis de Ciclo de Vida de baterías ion-litio[69][70].

En base a la comparación, se concluye que los resultados obtenidos para la categorías de impacto Potencial de Calentamiento Global no son concluyentes, dado que los resultados están sujetos a errores basados en los datos recopilados de inventario, estimación de los factores de emisión y supuestos tomados en los balances de masa y energía. Sin embargo, los resultados dependen de algunos puntos importantes. En el caso del Hidrógeno Fuel Cell, los resultados están condicionados por la eficiencia del sistema, dado que a menor eficiencia se requiere una mayor área de paneles solares. En el caso del sistema de baterías ion-Litio los resultados están condicionados por el número de ciclo de descarga de las baterías que afectan en su vida útil.

Capítulo 8

Evaluación de Agotamiento de Recursos Minerales

8.1. Factores de caracterización

A fin de obtener los factores de caracterización de la categoría de impacto Agotamiento de Recursos Minerales (MD: Metal Depletion), se utiliza la base de datos *Ecoinvent* y se toman los supuestos expuestos en la sección 7.1 para el caso de Potencial de Calentamiento Global.

En la Tabla 8.1 se presentan los factores de caracterización de los materiales utilizados en la fabricación de los equipos especificados en el capítulo 5.

Tabla 8.1: Factores de caracterización de la fabricación de equipos recopilados de la base de datos *Ecoinvent*.

Componente	MD [kgFe-eq]	Fuente
2-butoxietanol	0,0441	<i>Ecoinvent</i>
Butiral de polivinilo (aglutinante)	0,0122	<i>Ecoinvent</i>
Acero	3,1403	<i>Ecoinvent</i>
Acero Inoxidable	13,5721	<i>Ecoinvent</i>
Acetato de n-butilo	0,1977	<i>Ecoinvent</i>
Aleación de Aluminio	2,0232	<i>Ecoinvent</i>
Aluminio	0,9370	<i>Ecoinvent</i>
Carbón negro	0,0807	<i>Ecoinvent</i>
Carbonato de etileno	0,1293	<i>Ecoinvent</i>
Carbonato de etilmetilo	0,1293	<i>Ecoinvent</i>
Cobre	50,5010	<i>Ecoinvent</i>
Estaño	1.487,8971	<i>Ecoinvent</i>
Etilvinilacetato (EVA)	0,0975	<i>Ecoinvent</i>
Grafito	0,0043	<i>Ecoinvent</i>
HDPE	0,0061	<i>Ecoinvent</i>
Litio ferfosfato (LiFePO ₄)	0,5938	Estimación

Litio hexafluorofosfato (LiPF6)	3,1891	<i>Ecoinvent</i>
LSM ($La_{1-x}Sr_xCr_{0.5}Mn_{0.5}O_3$)	1,9298	Estimación
Membrana de polietileno	0,4295	<i>Ecoinvent</i>
Methocel A4M	0,6886	<i>Ecoinvent</i>
$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$	0,0127	<i>Ecoinvent</i>
Níquel	11,3787	<i>Ecoinvent</i>
Óxido de aluminio	0,1311	<i>Ecoinvent</i>
Óxido de níquel	11,3787	<i>Ecoinvent</i>
Película de fluoruro de polivinilo	0,9764	<i>Ecoinvent</i>
PET	0,1712	<i>Ecoinvent</i>
Plata	1.455,0371	<i>Ecoinvent</i>
Plomo	1,6909	<i>Ecoinvent</i>
Polipropileno	0,0030	<i>Ecoinvent</i>
Polisulfona	0,4295	<i>Ecoinvent</i>
Silicio	0,8818	<i>Ecoinvent</i>
Silicona	0,2303	<i>Ecoinvent</i>
Sulfuro de Níquel	5,2040	<i>Ecoinvent</i>
Sulfuro de polifenileno	0,4543	<i>Ecoinvent</i>
Vidrio Solar	0,1142	<i>Ecoinvent</i>
YSZ	0,3060	Estimación

Se observa que los materiales que poseen un mayor factor de caracterización son la plata, el estaño, el cobre, el níquel y el acero inoxidable.

En la Tabla 8.2 se presenta el factor de caracterización obtenido de *Ecoinvent*, utilizado para la etapa de desmantelamiento, donde se considera el fin de vida de los equipos electrónicos.

Tabla 8.2: Factor de caracterización utilizado para el fin de vida de los equipos en la etapa de desmantelamiento.

Actividad	Descripción	MD [kgFe – eq]
Desecho	Chatarra electrónica	0,003145

No es considerado el transporte de importación para la categoría de impacto Agotamiento de Recursos Minerales, ya que no existen factores de caracterización que relacionen esta categoría de impacto con el transporte.

8.2. Cuantificación de impacto

El cálculo del Agotamiento de Recursos Minerales sigue los pasos presentados en el Anexo D. Los resultados totales obtenidos para el caso de estudio se presentan en la Figura 8.1 donde se contrastan con las emisiones totales para el sistema Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías ion-Litio.

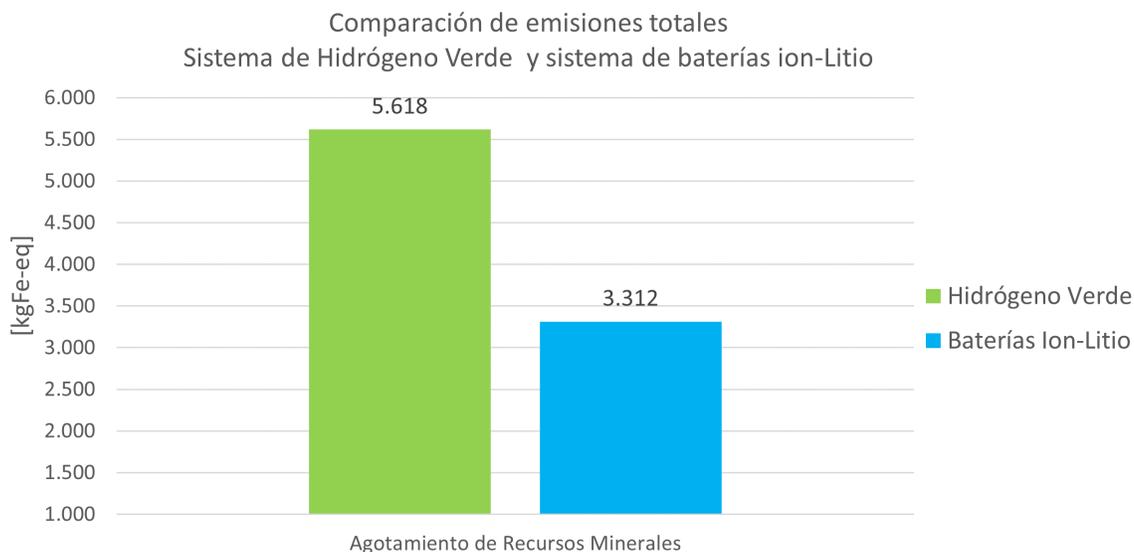


Figura 8.1: Comparación de resultados globales de Agotamiento de Recursos Minerales del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías ion-Litio.

El Agotamiento de Recursos Minerales para el sistema de Baterías ion-Litio es menor al sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*, donde se presenta una diferencia de un 37,44%. En comparación a los resultados de la categoría de impacto anterior, es posible evidenciar que en este caso existe una brecha mayor.

En la Figura 8.2 se presenta el impacto ambiental por macroetapa del ciclo de vida de los sistemas: Instalación, Mantenimiento y Desmantelamiento. En base a lo observado, se evidencia que en la macroetapa de Instalación se presenta un mayor Agotamiento de Recursos Minerales y se observa una diferencia de un 42,13% entre los sistemas de estudio. La razón de esta diferencia se debe a que la fabricación de paneles solares posee una entrada de metales que cada vez son más escasos como cobre, plata y estaño, por tanto poseen un alto factor de caracterización y como se menciona en los capítulos anteriores, el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* posee una eficiencia menor que el sistema de Baterías de litio, lo que se refleja en la utilización de un mayor área de paneles para almacenar el mismo flujo de energía.

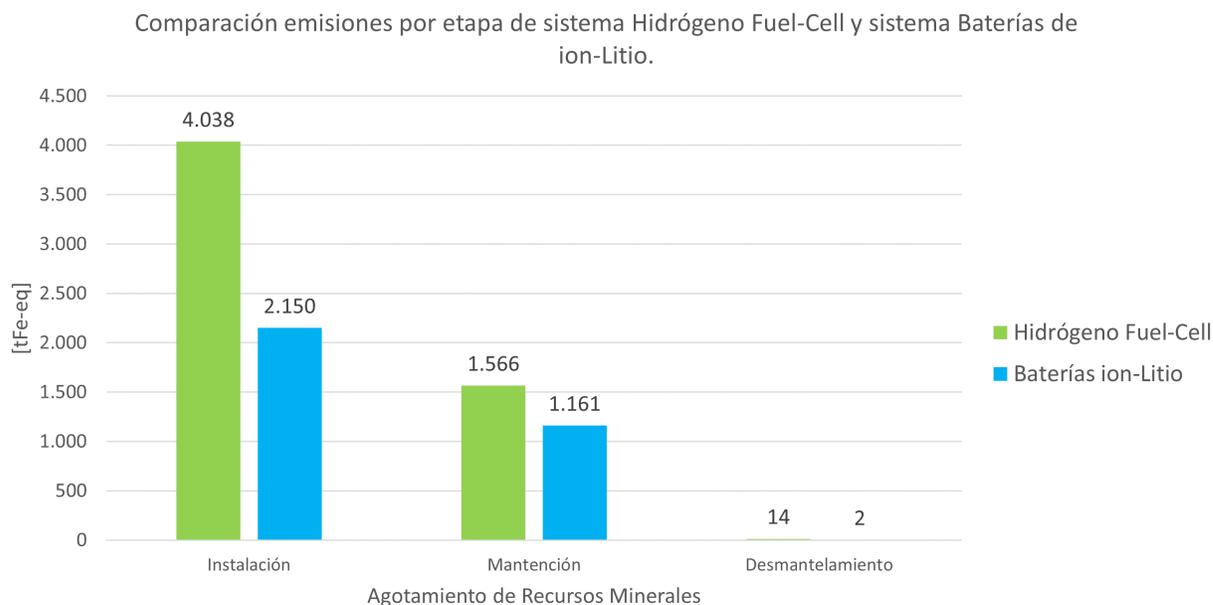


Figura 8.2: Comparación de resultados de Agotamiento de Recursos Minerales por etapa de ciclo de vida del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías ion-Litio.

Con respecto a la etapa de mantención, se obtienen valores más cercanos entre sí con una diferencia de un 25,9%. En el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* se deben reponer una mayor masa de paneles solares que en el sistema de Baterías ion-Litio, sin embargo se contraponen con el número de baterías de ion-Litio que se deben reemplazar en el horizonte temporal de 25 años, lo que implica un requerimiento importante de metales como el aluminio, acero y litio.

En la Figura 8.3 se presenta la distribución de impacto en la macro etapa de Instalación. Se observa que la fabricación de los paneles solares es responsable de la mayor parte del Agotamiento de Recursos Minerales en la macro etapa de Instalación. También, se observa a modo de comparación que la fabricación del sistema de almacenamiento de hidrógeno presenta un impacto mayor que la fabricación de las baterías de ion-Litio, debido a la masa de materia prima que utiliza el sistema de hidrógeno considerando que está compuesto por 14 equipos. El elemento que más contribuye al impacto de Agotamiento de Recursos Minerales es el cobre, dado que es uno de los elementos más demandados a nivel mundial y se espera que la demanda siga creciendo debido a la transición de energías independientes de combustibles fósiles [71].

En la Figura 8.4 se presenta la distribución de impacto en la macro etapa de Mantenición. Se observa que el reemplazo del balance del sistema posee un mayor impacto que las demás etapas en ambos casos de estudio. La razón consiste en que la fabricación de equipos electrónicos como el inversor y el transformador, implican la extracción de materias primas como el cobre y el aluminio para las conexiones eléctricas, sumado a esto, los equipos del balance del sistema poseen un tiempo de vida útil menor que los paneles solares, por lo tanto se deben reemplazar más veces durante el horizonte temporal. Finalmente, el impacto de la etapa de Desmantelamiento es consecuencia de la disposición final de los equipos, donde se consideran chatarra electrónica. El detalle se presenta en el Anexo D.

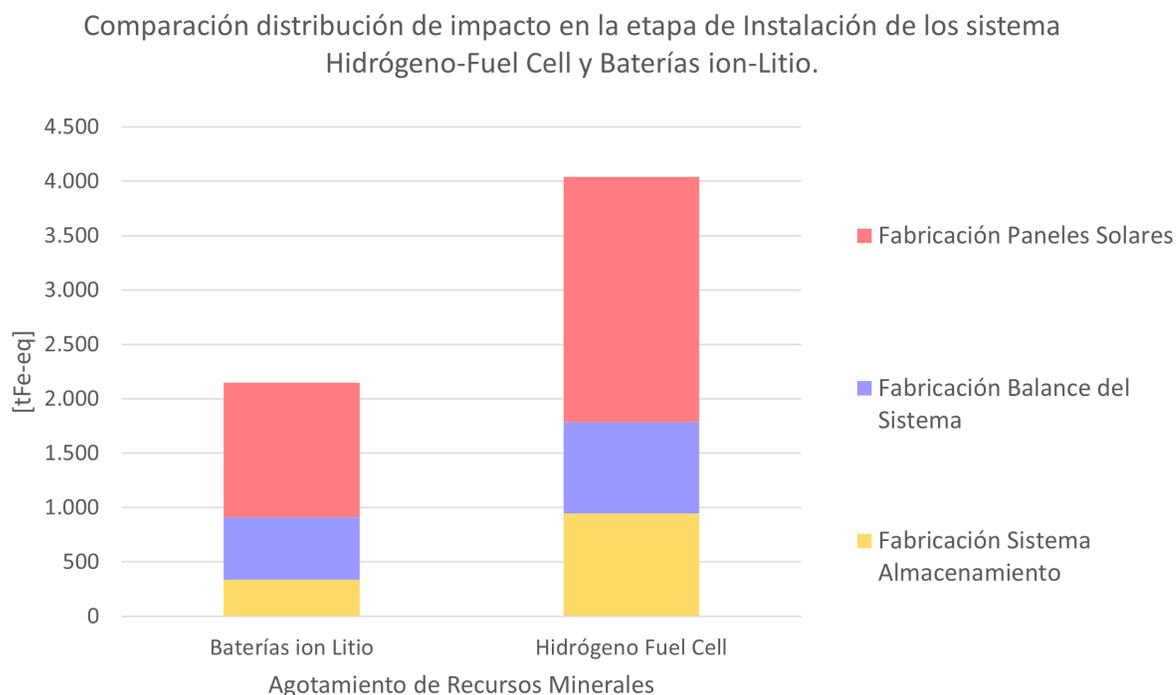


Figura 8.3: Comparación de resultados de Agotamiento de Recursos Minerales en la macroetapa Instalación del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías ion-Litio.

Comparación distribución de impacto en la etapa de Mantenimiento de los sistema Hidrógeno-Fuel Cell y Baterías ion-Litio.

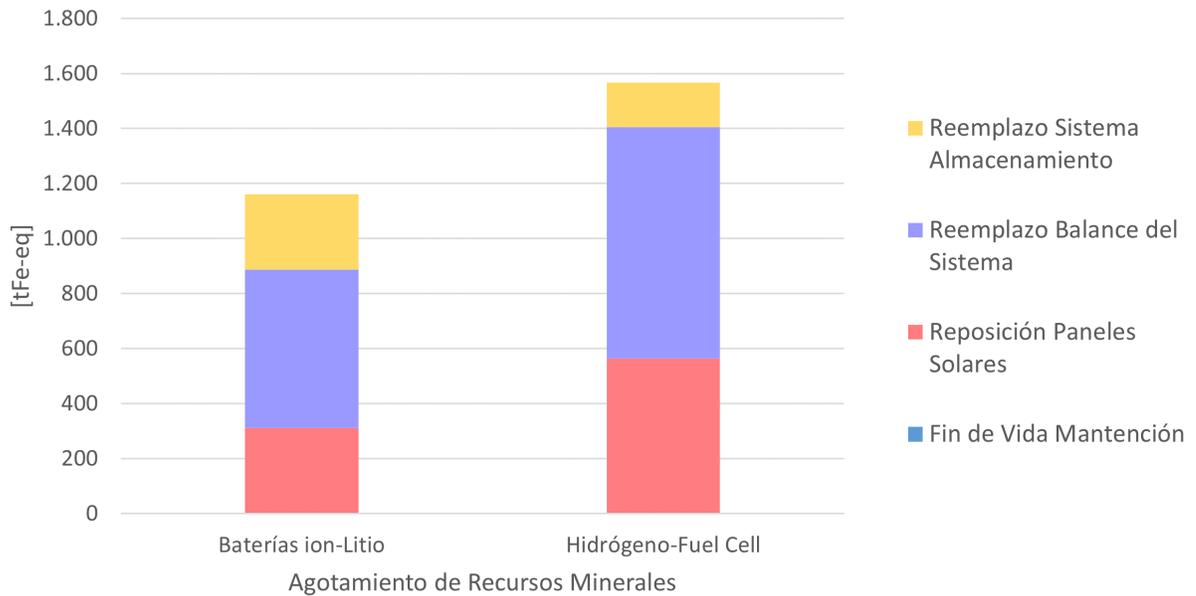


Figura 8.4: Distribución de emisiones de Agotamiento de Recursos Minerales en la etapa de Mantenimiento del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* y el sistema de Baterías ion-Litio.

8.3. Análisis de Sensibilidad

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que uno de los puntos críticos del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* es la baja de eficiencia en el proceso de almacenamiento energético. Al ser menos eficiente el sistema, se necesita mayor flujo de energía de entrada lo que implica un mayor área de paneles solares, lo que a su vez aumenta el impacto ambiental.

Análisis de Sensibilidad del sistema Hidrógeno Fuel Cell

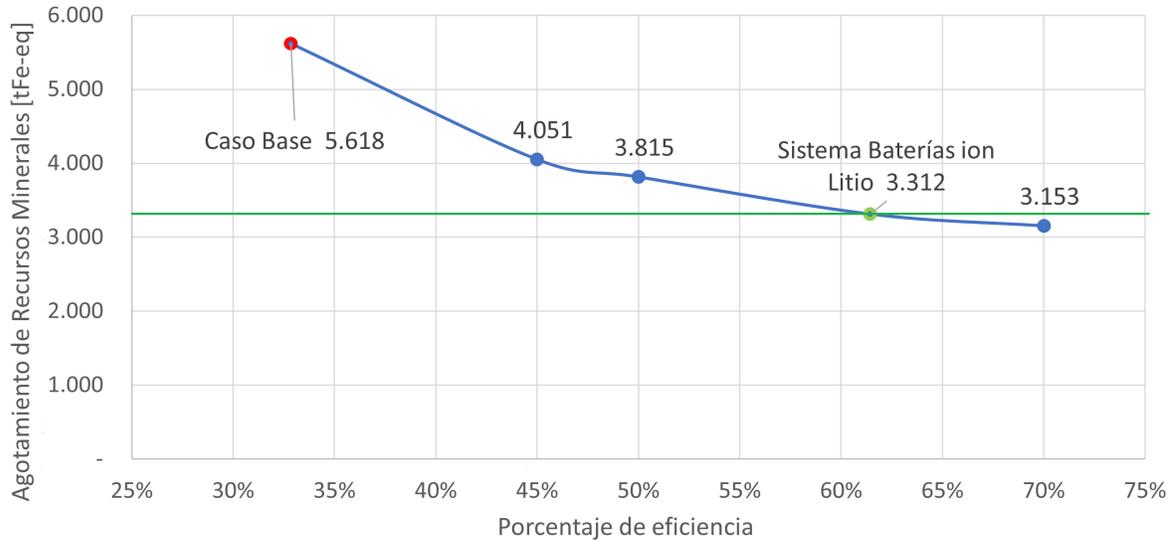


Figura 8.5: Análisis de sensibilidad sobre el Agotamiento de Recursos Minerales en el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* en función de la eficiencia del sistema.

El sistema Hidrógeno *Fuel Cell* obtiene un peor desempeño que el sistema de Baterías ion-Litio en la categoría de impacto Agotamiento de Recursos Minerales, con una diferencia de un 42,3%. En la Figura 8.5 se presenta un análisis de sensibilidad en torno a la eficiencia del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*, aumentado su eficiencia desde el caso base (32,9%) hasta una eficiencia del 70%.

Se observa que al aumentar la eficiencia del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* a un 45%, el Agotamiento de Recursos Minerales disminuye en un 27,98%, sin embargo en este escenario, el sistema de Baterías ion-Litio aún posee un Agotamiento de Recursos Minerales menor que el sistema Hidrógeno *Fuel Cell*. De modo que, se identifica el escenario de eficiencia donde el impacto de la categoría en cuestión, es igual al caso de Baterías ion-Litio. A este punto se le denomina *punto de inflexión* (punto verde en el gráfico), en definitiva, el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* debe tener una eficiencia de almacenamiento del 61,4% (*punto de inflexión*) para igualar el Agotamiento de Recursos Minerales del sistema Baterías ion-Litio. Esto implica aumentar la eficiencia del caso base en un 46,6% para disminuir el Agotamiento de Recursos Minerales en un 41,1%.

Al analizar los resultados del sistema de baterías ion-litio, se identifica una de las etapas críticas del sistema es la mantención, dado que las baterías ion-Litio poseen una vida útil más acortada que los equipos del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* causada por el número de ciclos de descarga que pueden realizar durante el horizonte temporal. En la Figura 8.6 se presenta un análisis de sensibilidad de los resultados de la categoría de impacto Agotamiento de Recursos Minerales en función del número de ciclos de descarga de las baterías ion-litio.

Análisis de Sensibilidad del sistema Baterías ion-Litio

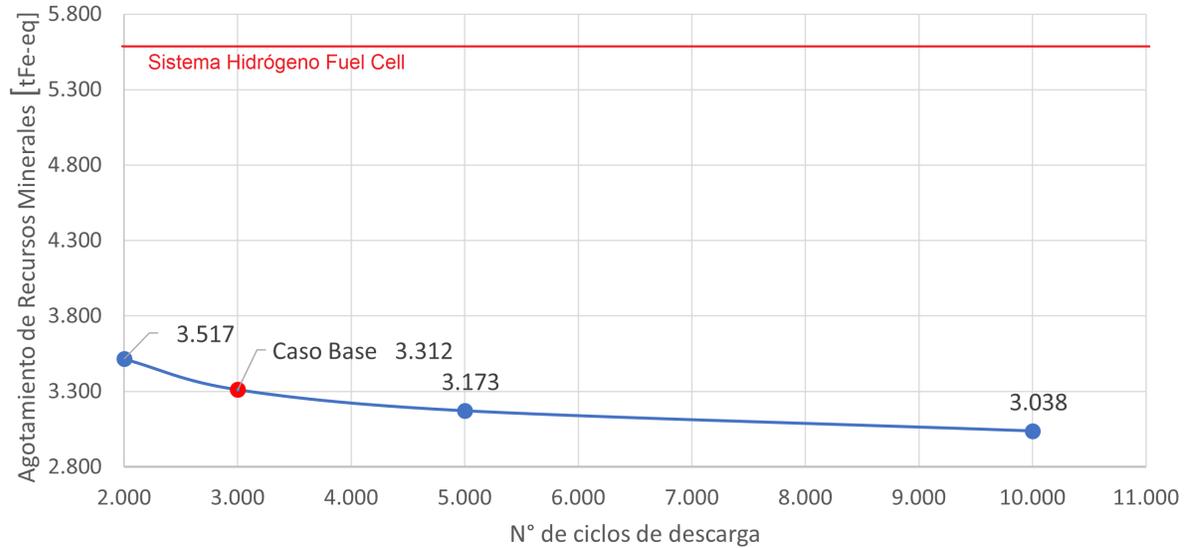


Figura 8.6: Análisis de sensibilidad sobre el Agotamiento de Recursos Minerales en el sistema de Baterías ion-Litio en función del número de ciclos de descarga.

Al aumentar los ciclos de descarga de las baterías, se disminuye el número de reemplazos que se requieren durante el horizonte temporal. Durante el horizonte temporal de 25 años, se realizan 9125 ciclos de descarga. Por tanto, en el caso base las baterías poseen 3.000 ciclo de descarga lo que implica requerir de 3 sistemas de baterías durante el horizonte temporal. Al aumentar el número de ciclo de descarga a 5.000, el sistema de baterías se reemplaza una vez durante el horizonte temporal. Si se considera un sistema de baterías con 10.000 ciclos de descarga, no es necesario reemplazar el sistema dado que su vida útil duraría durante los 25 años.

Se puede notar que al aumentar el número a 5.000, el resultado de Agotamiento de Recursos Minerales disminuye un 4% y al aumentar los ciclos de descarga a 10.000, se disminuye un 8% el impacto. Es decir, en esta categoría de impacto no es incidente la fabricación de las baterías de ion-Litio en comparación a la fabricación de los paneles solares.

8.4. Discusión

En cuanto a los resultados de la categoría de impacto Agotamiento de Recursos Minerales, es posible mencionar que existe una gran diferencia en los sistemas de estudio. En la Figura 8.1 se observa que el sistema Hidrógeno *Fuel Cell* presenta un impacto mayor en base a esta categoría de impacto, con una diferencia del 42,1% con respecto al sistema de Baterías ion-Litio. En la Figura 8.2 se observa que esta diferencia se presenta en la macroetapa Instalación, y en la Figura 8.3 se observa que el impacto proviene en gran porcentaje de la etapa de fabricación de paneles solares, donde el sistema Hidrógeno *Fuel Cell* presenta un Agotamiento de Recursos Minerales de 2.252 [tFe - eq], mientras que el sistema de Baterías ion-Litio presenta un valor de 1.239 [tFe - eq], es decir existe una diferencia del 46% para la etapa de fabricación de paneles solares.

Los recursos que más contribuyen al Agotamiento de Recursos Minerales corresponden a la metalización del panel fotovoltaico debido a los materiales utilizados, entre los metales con mayor contribución al Agotamiento de Recursos Minerales en la fabricación del panel solar, se encuentra el estaño con un 54,9%, seguido del cobre con un 14,46%. Esto se debe principalmente a la escasez de ambos recursos, el estaño es producido principalmente por China con un 50% de la producción y refinación de este metal. En la primera mitad de 2021, la demanda de estaño utilizado en soldaduras de productos electrónicos superó la oferta, lo que provocó un aumento de precios de más del 90% en la Bolsa de Metales de Londres. Sin embargo, se espera que el mercado crezca a un ritmo constante entre 2022 y 2027[72]. Con respecto al cobre, se espera que la demanda anual se expanda un 53% hasta 2040, impulsada principalmente por la electrificación del transporte y el crecimiento de las energías renovables[71].

Por otro lado, en la Figura 8.4 se desglosa los resultados de la macroetapa Mantenimiento, donde se observa que la actividad que mayor Agotamiento de Recursos Minerales presenta es el reemplazo del balance del sistema, en ambos casos de estudio. La justificación nuevamente es el uso de cobre, siendo responsable de un 99,45% del impacto ambiental en esta categoría para la fabricación de los equipos del balance del sistema.

En las Figuras 7.2 y 8.2 se observa que la etapa de Desmantelamiento es la menos incidente en los resultados del impacto ambiental. Esto se debe a que se considera la disposición final de los equipos como chatarra electrónica, por tanto no existe una emisión de carbono significativa en esta etapa y tampoco se considera un Agotamiento de Recursos Minerales ya que se contabiliza en la fabricación del equipo. Sin embargo, se cree importante evaluar en esta etapa una reincorporación de los materiales mediante procesos de reciclaje de los metales o reutilización de los equipos. De esta forma, puede disminuir el impacto en las etapas de Instalación y Mantenimiento ya que se disminuiría la producción primaria de las materias primas [73].

En el análisis de sensibilidad, se identifica el escenario de eficiencia del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* donde el impacto del Agotamiento de Recursos Minerales se iguala al caso del sistema de Baterías ion-Litio. en la Figura 8.5 se observa que la eficiencia que necesita el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* para llegar a este punto de inflexión es de un 61,4%, se considera que este escenario es difícil de lograr con la tecnología actual de los equipos electroquímicos, ya que se necesitaría electrolizadores y *Fuel Cell* que tengan una eficiencia cercana al 80%, lo cual aún no es factible en sistema a gran escala. Por otro parte, en las Figuras 8.6 y 7.6 se presenta un análisis de sensibilidad de los resultados del sistema de baterías ion-Litio, donde se observa que al aumentar los ciclos de descarga de las baterías, aumenta su vida útil por ende se requieren menos reemplazo de batería, lo que su vez se traduce en una disminución del impacto ambiental en ambas categorías. Se considera que aumentar el tiempo de vida útil de las baterías es más factible que aumentar la eficiencia del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*, esta consideración se basa en que tecnológicamente las baterías de litio están más cerca de llegar a un valor similar a las 10.000 ciclos de descarga, dado que existen baterías en sistemas de electromovilidad que alcanzan los 7.000 ciclos de descargas, permitiendo un tiempo de vida útil cercano a los 15 años [74].

A modo de comparación final, se concluye que en la categoría de impacto Agotamiento

to de Recursos Minerales es evidente cuál sistema presenta un mejor desempeño, donde el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* se ve perjudicado por el bajo nivel de eficiencia energética, necesitando más material por flujo de energía almacenado. Los resultados están fuertemente condicionados por el número de paneles fotovoltaicos que presenta el sistema. En consecuencia, si los paneles no aportaran de forma tan significativa al impacto, la baja eficiencia del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* no se traduciría en una diferencia de impacto tan significativa. Por tanto, posicionándose en el escenario que la fabricación de los paneles solares disminuya su impacto ambiental, como por ejemplo disminuyendo la masa de metales primarios que los componen, el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* podría ser más conveniente desde el enfoque ambiental en comparación al sistema de Baterías ion-Litio. Se concluye la importancia del impacto de los paneles fotovoltaicos es tal que condiciona el impacto del sistema: el sistema que requiere menos paneles, presenta un menor impacto.

Capítulo 9

Conclusiones

El abastecimiento de energía eléctrica con fuentes renovables ha tomado un papel importante en los últimos años, Chile tiene metas de largo plazo donde establece que al menos el 70 % de la energía eléctrica generada anualmente provenga de fuentes renovables no convencionales al año 2050. Es importante complementar la entrada de energías renovables no convencionales junto con sistemas de almacenamiento que permiten reducir la variabilidad climática y horaria.

En este contexto, se realizó un Análisis de Ciclo de Vida de dos sistemas de almacenamiento energético para plantas fotovoltaicas: sistema de Hidrógeno Fue Cell y sistema de baterías ion-Litio, se evaluaron mediante dos categorías de impacto ambiental: Potencial de Calentamiento Global y Agotamiento de Recursos Minerales.

En base a los resultados obtenidos para la categoría de impacto Potencial de Calentamiento Global, se obtienen valores muy similares para los dos sistemas de estudio, donde el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* presenta una emisión de GEI 3,94 % menor que el sistema de Baterías de ion-Litio. Por tanto, se evidencia que esta categoría de impacto no presenta resultados concluyentes considerando que los resultados están sujetos a errores de datos de inventario recopilados y estimaciones realizadas. En cuanto a la categoría de impacto Agotamiento de Recursos Minerales, se obtiene una diferencia significativa entre los resultados de los sistemas, con un impacto de un 41,2 % mayor para el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*.

Se identifica que la etapa que produce un mayor impacto ambiental en ambos sistemas de estudio corresponde a la fabricación de los paneles solares en la etapa de Instalación. Donde los materiales más contribuyentes son el silicio en la categoría de impacto Potencial de Calentamiento Global, y el estaño en la categoría de Agotamiento de Recursos Minerales. Esto plantea desafíos en la fabricación de los paneles solares, como disminuir la utilización de metales primarios en la composición de dicho equipo, ya sea mediante la incorporación de metales reciclados o diseñando paneles solares que sean más eficientes en base a la relación masa/potencia.

Mediante el Análisis de Sensibilidad, se identifica el potencial de disminución de impacto en función de los puntos de mejora de los sistemas de almacenamiento. En el caso del sistema de Hidrógeno-Fuel Cell, la eficiencia del sistema corresponde a un 32,9 % y para igualar el impacto del Agotamiento de Recursos Minerales con el sistema de baterías ion-Litio, debe

alcanzar una eficiencia del 61,4 %, aproximadamente el doble de la eficiencia actual. En el caso del sistema de baterías ion-Litio, el punto de mejora escogido para analizar corresponde a la cantidad de ciclos de descarga de las baterías de 3.000 ciclos lo que desfavorece su tiempo vida útil. Se obtiene que al aumentar el número a 5.000, el resultado de Agotamiento de Recursos Minerales disminuye un 4 % y al aumentar los ciclos de descarga a 10.000, se disminuye un 8 % el impacto. Es decir, en esta categoría de impacto no es incidente la fabricación de las baterías de ion-Litio.

Se concluye que el sistema de baterías ion-Litio se encuentra en un mejor escenario en base a los resultados de las categorías de impacto ambiental. Además, posee un mayor potencial de disminución de impacto en el tiempo, dado que actualmente se proyecta a corto plazo un aumento significativo del número de ciclos de descarga de las baterías ion-Litio. No así el aumento de eficiencia del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*, ya que implica un desafío tecnológico aún más complejo considerando que actualmente la eficiencia de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno poseen valores cercanos al 30 %, por tanto el desafío implicaría duplicar la eficiencia del sistema en el corto plazo. Otro desafío es disminuir el impacto ambiental de la fabricación de los paneles solares, dado que en ese escenario el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* podría ser más conveniente desde el enfoque ambiental en comparación al sistema de Baterías ion-Litio. Se concluye la importancia del impacto de los paneles fotovoltaicos es tal que condiciona el impacto del sistema: el sistema que requiere menos paneles, presenta un menor impacto.

Se propone en un futuro trabajo considerar en el Análisis de Ciclo de Vida, la fabricación de paneles solares que se compongan de metales reciclados, o que posean una menor cantidad de masa manteniendo la eficiencia de operación, de esta forma que los resultados obtenidos podrían presentar diferencias significativas a los resultados obtenidos en el presente estudio. Sumado a esto, sería conveniente evaluar ambas tecnologías de almacenamiento en el contexto de otro tipo de ERNC como lo es una planta eólica, dado que los aerogeneradores podrían presentar una incidencia menor en los resultados obtenidos en comparación a los paneles solares.

Bibliografía

- [1] MINISTERIO DE ENERGÍA (2020), *Política energética de Chile, Energía 2050*.
- [2] MINISTERIO DE ENERGÍA (2014), *Energías renovables en Chile el potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé*.
- [3] MINISTERIO DE ENERGÍA (2020), *PELP. Capacidad instalada de generación Noviembre 2020, Informe de actualización de antecedentes 2020*.
- [4] AGUIRRE, S. (2015), *Potencialidad de un sistema BESS para regular la variabilidad de centrales ERNC Universidad Católica de Chile*.
- [5] LAMIGUEIRO, O. P. (2013). *Energía solar fotovoltaica. Creative Commons ebook. España. 192pp*.
- [6] ZEA FALCÓN, A. (2019)., *Estudio comparativo de tecnologías de almacenamiento energético y evaluación de su potencial para la integración de generación renovable en sistemas eléctricos aislados*.
- [7] LAVADOS MUNITA, T. (2013). *Aplicación de acumuladores electroquímicos para el almacenamiento comercial de energía eléctrica en sistemas interconectados*.
- [8] UBIÑAS, E. I. R. (2015). *Almacenamiento de energía térmica por calor latente en los edificios: bases para la optimización de aplicaciones pasivas, opacas y traslúcidas*.
- [9] GONZÁLEZ, G. (2013) *Almacenamiento de energía magnética por superconducción*.
- [10] HIDALGO, J. J. M. (2019). *Tecnologías de almacenamiento de energía con énfasis en electroquímica (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Tulancingo)*.
- [11] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ) MINISTERIO DE ENERGÍA (2020) *Sistemas de Almacenamiento con Energía Solar Fotovoltaica en Chile*
- [12] JUL, M. D. C. C., DE LEÓN, M. M. P., GUERRA, C. F. (2010). *El hidrógeno como almacén energético: aplicación de la pila de combustible reversible polimérica. In Anales de la Real Academia de Doctores (Vol. 14, No. 1, pp. 71-92). Real Academia de Doctores de España*.
- [13] ANGARITA GUERRA, L. A., PEREIRA OSORNO, J. F. (2017). *Evaluación energética de baterías de hierro-níquel para el almacenamiento estacionario en sistemas fotovoltaicos*
- [14] FUENZALIDA RAMÍREZ, S. E. (2014). *Análisis térmico de sistemas de almacenamiento energético basados en baterías de ión-litio*.
- [15] ARSHAD, F., LIN, J., MANURKAR, N., FAN, E., AHMAD, A., WU, F. LI, L. (2022). *Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries: A Critical Review. Resources, Conser-*

- vation and Recycling, 180, 106164.
- [16] OLMO ESTEBAN, G. (2019). *Caracterización de baterías de litio para el estudio del envejecimiento*.
- [17] MADDALENA, A., PETRIS, M., PALADE, P., SARTORI, S., PRINCIPI, G., SETTIMO, E., RUSSO, S. L. (2006). *Study of Mg-based materials to be used in a functional solid state hydrogen reservoir for vehicular applications. International Journal of hydrogen energy, 31(14), 2097-2103.*
- [18] MORI, M., JENSTERLE, M., MRŽLJAK, T., DROBNIČ, B. (2014). *Life-cycle assessment of a hydrogen-based uninterruptible power supply system using renewable energy. The International Journal of Life Cycle Assessment, 19(11), 1810-1822.*
- [19] MELAINA, M. W., EICHMAN, J. (2015). *Hydrogen energy storage: grid and transportation services. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory.*
- [20] GARCÍA, M. M., PINEDA, H. R. (2013). *Optimización de una celda combustible de hidrógeno. Scientia et technica, 18(1), 200-205.*
- [21] WAN, L., ZHANG, W., XU, Z. (2020, SEPTEMBER). *Overview of Key Technologies and Applications of Hydrogen Energy Storage in Integrated Energy Systems. In 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) (pp. 1-5). IEEE.*
- [22] Soto Alegre, O. E. (2020). *Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada.*
- [23] BARTHÉLÉMY, H. (2012). *Hydrogen storage—Industrial perspectives. International journal of hydrogen energy, 37(22), 17364-17372.*
- [24] TÖPLER, J., LEHMANN, J. (2016). *Hydrogen and fuel cell. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.*
- [25] SRINIVASAN, S. (2006). *Fuel cells: from fundamentals to applications. Springer Science Business media. (p.260)*
- [26] Alvarado-Flores, J., Ávalos-Rodríguez, L. (2013). *Materiales para ánodos, cátodos y electrolitos utilizados en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC). Revista mexicana de física, 59(1), 66-87.*
- [27] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 2000. *Environmental management- Life cycle assessment- Life cycle impact assessment: ISO 14042.*
- [28] HAUSCHILD, M. Z., ROSENBAUM, R. K., OLSEN, S. I. (2018). *Life cycle assessment (Vol. 2018). Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>.*
- [29] WERNET, G., BAUER, C., STEUBING, B., REINHARD, J., MORENO-RUIZ, E., WEIDEMA, B. (2016). *The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21(9), 1218-1230.*
- [30] V. STREZOV, X. ZHOU Y T. J. EVANS, «*Life cycle impact assessment of metal production industries in Australia,*» *Scientific Reports, vol. 11, n.o 1, págs. 1-9, 2021, issn: 20452322*

- [31] ECOCHAIN LUC, HILLEGE (2019), *Impact Categories (LCA)* [url:https://ecochain.com/knowledge/impact-categories-lca/](https://ecochain.com/knowledge/impact-categories-lca/).
- [32] MORI, M., JENSTERLE, M., MRŽLJAK, T., DROBNIČ, B. (2014). *Life-cycle assessment of a hydrogen-based uninterruptible power supply system using renewable energy. The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(11), 1810-1822.
- [33] WANG, Q., LIU, W., YUAN, X., TANG, H., TANG, Y., WANG, M. SUN, J. (2018) *Environmental impact analysis and process optimization of batteries based on life cycle assessment. Journal of cleaner production*, 174, 1262-1273.
- [34] MELLINO, S., PETRILLO, A., CIGIOTTI, V., AUTORINO, C., JANNELLI, E., ULGIATI, S. (2017). *A Life Cycle Assessment of lithium battery and hydrogen-FC powered electric bicycles: Searching for cleaner solutions to urban mobility. International Journal of Hydrogen Energy*, 42(3), 1830-1840.
- [35] OSSES MC-INTYRE, P., ESCOBAR, R., DEL RIO, C., GARCIA, R., VARGAS, C. (2017). *El Clima desértico costero con nublados abundantes del desierto de Atacama y su relación con los recursos naturales energía solar y agua de niebla. Caso de estudio Alto Patache (20, 5° S), región de Tarapacá, Chile*.
- [36] POTENCIALES DE ENERGÍA, **Recurso Solar, Radiación global horizontal – Región de Atacama 2022** [en línea] <https://potenciales.minenergia.cl/potencialesv2/?page_id=13> [consulta: 30 de agosto 2022]
- [37] CARRILLO, A. (1 DE DICIEMBRE DE 2021) *Colbún sella acuerdo con gigante de Finlandia para almacenamiento de energía en planta solar. Diario Sustentable* [en línea] <<https://www.diariosustentable.com/2021/12/colbun-sella-acuerdo-con-gigante-de-finlandia-para-almacenamiento-de-energia-en-planta-solar/>> [consulta: 30 de agosto 2022]
- [38] PKE NEW ENERGY EN SHENZHEN, CHINA (2022) *Lithium ion battery 20kwh 48v 400ah lifepo4 for solar energy storage* [en línea]<https://www.alibaba.com/product-detail/Lithium-Ion-For-Solar-Power-Battery_1600071400037.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.743521952f6eD9&s=p> [consulta: 30 de agosto]
- [39] PKE NEW ENERGY EN SHENZHEN, CHINA (2022) [en línea] <<http://www.pkechina.com/col.jsp?id=104>> [consulta 30 de agosto]
- [40] CHOUDHURY, A., CHANDRA, H., ARORA, A. (2013). *Application of solid oxide fuel cell technology for power generation—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 430-442.
- [41] GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. (2020) *Calentamiento global de 1,5°C: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres*
- [42] GUINÉE, J.B.; GORÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; DE KONING, A.; VAN OERS, L.; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; ET AL. (2002) *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*.

- [43] NIEMBRO, J., GONZÁLEZ, M. (2008). *Categorías de evaluación de impacto de ciclo de vida vinculadas con energía: revisión y prospectiva*.
- [44] BARKER, D., WALSH, F. C. (1991). *Applications of Faraday's laws of electrolysis in metal finishing*. *Transactions of the IMF*, 69(4), 158-162.
- [45] ROJAS MANTILLA, A. M., QUILAGUY FAJARDO, M. E. (2016) *Desarrollo de un prototipo para la producción de Hidrógeno a partir de electrolisis*. Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB.
- [46] MORENTE FERNÁNDEZ, C. (2015). *Análisis y modelado del comportamiento de baterías para vehículos eléctricos (Bachelor's thesis)*.
- [47] NAZRI, G. A., PISTOIA, G. (EDS.). (2008). *Lithium batteries: science and technology*. Springer Science Business Media.
- [48] CAÑETE PELLICER, R. (2020). *Proyecto de diseño y construcción de un prototipo para la carga y la descarga en valores prefijados de baterías de ion-litio de forma automática con visualización del voltaje mediante un ordenador (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya)*.
- [49] MINISTERIO DE ENERGÍA (2020) *Explorador Solar, Generación Eléctrica Fotovoltaica* [en línea] <<https://solar.minenergia.cl/fotovoltaico>> [consulta: 30 de agosto 2022]
- [50] ÇENGEL, YUNES A, BOLES, MICHAEL A., GONZALEZ Y POZO, VIRGILIO Y SARMIENTO ORTEGA, SERGIO. 2006. *Termodinámica. 7ma Ed. Ciudad de México. McGraw-Hill. 1009 p. ISBN 978-0-07-352932-5*.
- [51] FRISCHKNECHT, R., ITTEN, R., SINHA, P., DE WILD-SCHOLTEN, M., ZHANG, J., FTHENAKIS, V., ... STUCKI, M. (2015). Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems. PVPS Task, 12.
- [52] MASON, J.E., V. M. FTHENAKIS, T. HANSEN, AND H. C. KIM (2006), *Energy Payback and Life-cycle CO₂ Emissions of the BOS in an Optimized 3.5 MW PV Installation*, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 14:179-190
- [53] ZHAO, G., KRAGLUND, M. R., FRANDBSEN, H. L., WULFF, A. C., JENSEN, S. H., CHEN, M., GRAVES, C. R. (2020). *Life cycle assessment of H₂O electrolysis technologies*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23765-23781.
- [54] GANDIGLIO, M., DE SARIO, F., LANZINI, A., BOBBA, S., SANTARELLI, M., BLENGINI, G. A. (2019). *Life cycle assessment of a biogas-fed solid oxide fuel cell (SOFC) integrated in a wastewater treatment plant*. *Energies*, 12(9), 1611.
- [55] BEIJING SINOHY ENERGY CO., LTD, (SINOHY) (2021) *20MPa 200 bar high pressure hydrogen storage tank* [en línea] <https://www.alibaba.com/product-detail/Bar-Hydrogen-Tank-20MPa-200-Bar_1600083747393.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.70f43eb5krveAi&s=p> [consulta 12 de julio]
- [56] CHENGLI SPECIAL AUTOMOBILE CO. (2022) *50 m³ 25 ton hydrogen gas storage tank*[en línea] <https://www.alibaba.com/product-detail/50000-liter-50-m3-25-ton_60460941815.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.a0ce47ddB317qQ> [consulta 12 de julio]
- [57] LVYUAN (2022) *10 m³ Sanitary hot water tank storage water tank*[en línea] <<https://>

www.alibaba.com/product-detail/200L-Sanitary-hot-water-tank-storage_62161908043.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.78e83258Mg1tGT>

- [58] DP WORLD, SEA RATES *Distance Time* [en línea] <<https://www.searates.com/es/services/distances-time/>> [consulta 26de julio]
- [59] ROMERO CAMPOS, J. P. (2019). *Análisis ciclo vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos*.
- [60] WANG, Z., CHEN, Z., WENNERSTEN, R., SUN, Q. (2022, FEBRUARY). *Life Cycle Assessment for Balance-of-System of Photovoltaic Energy Systems*. In *2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)* (pp. 553-564). IEEE.
- [61] LIANG, Y., SU, J., XI, B., YU, Y., JI, D., SUN, Y., ... ZHU, J. (2017). *Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emissions*. *Resources, conservation and recycling*, 117, 285-293.
- [62] DAI, Q., KELLY, J. C., GAINES, L., WANG, M. (2019). *Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications*. *Batteries*, 5(2), 48.
- [63] ALARCON VANEGAS, W. A., SÁNCHEZ JAIMES, S. (2021). *Características de baterías para instalaciones de sistemas fotovoltaicos aislados en zonas rurales del departamento de Santander Colombia*.
- [64] DEFRA. *Conversion factors 2021 condensed set most users*. [en línea] <<https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2021>> [consulta 23 de julio]
- [65] STOPPATO, A. (2008). *Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation*. *Energy*, 33(2), 224-232.
- [66] HAO, H., MU, Z., JIANG, S., LIU, Z., ZHAO, F. (2017). *GHG Emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China*. *Sustainability*, 9(4), 504.
- [67] GARCÍA CASTILLO, A. (2021). *Análisis del Ciclo de Vida de una instalación fotovoltaica en Jaén*.
- [68] SUMPER, A., ROBLEDO-GARCÍA, M., VILLAFÁFILA-ROBLES, R., BERGAS-JANÉ, J., ANDRÉS-PEIRÓ, J. (2011). *Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain)*. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(8), 3888-3896.
- [69] Arshad, F., Lin, J., Manurkar, N., Fan, E., Ahmad, A., Wu, F., ... Li, L. (2022). *Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries: A Critical Review*. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106164.
- [70] GAINES, L., SULLIVAN, J., BURNHAM, A., BELHAROUAK, I. (2011, JANUARY). *Life-cycle analysis for lithium-ion battery production and recycling*. In *Transportation Research Board 90th Annual Meeting*, Washington, DC (pp. 23-27).
- [71] JONES, B., ACUÑA, F., RODRÍGUEZ, V. (2021). *Cambios en la demanda de minerales: análisis de los mercados del cobre y el litio, y sus implicaciones para los países de la región andina*.
- [72] YANG, C., TAN, Q., ZENG, X., ZHANG, Y., WANG, Z., LI, J. (2018). *Measuring the sustainability of tin in China*. *Science of the Total Environment*, 635, 1351-1359.

- [73] IOAKIMIDIS, C. S., MURILLO-MARRODÁN, A., BAGHERI, A., THOMAS, D., GENIKOMSAKIS, K. N. (2019). *Life cycle assessment of a lithium iron phosphate (LFP) electric vehicle battery in second life application scenarios*. *Sustainability*, 11(9), 2527.
- [74] CONDE VELASCO, A. (2020). *Estudio, análisis y desarrollo de un modelo genérico de envejecimiento para baterías de ion-litio. aplicación a LFP y NMC (Doctoral dissertation, Industriales)*.
- [75] TOPLONG MECHANICAL (2022) *Hydrogen Compressor 200 Bar* [en línea] <https://www.alibaba.com/product-detail/Hydrogen-Compressor-200-Bar-Hydrogen-Wholesale_1600544823337.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.433325f7BZaSn4&cs=p> [consulta 2 de julio]
- [76] TRADING COMPANY (2016) *Oil Free Oxygen Compressor Oxygen Booster O2 Compressor* [en línea] <https://www.alibaba.com/product-detail/Oil-Free-Oxygen-Compressor-Oxygen-Booster_60672043744.html?spm=a2700.7724857.normalList.22.46ba6c2dOpIL2X> [consulta 2 de julio]
- [77] MANUFACTURER, TRADING COMPANY (2012) *Industrial Shell And Tube Heat Exchanger Water Cooled Condenser* <https://www.alibaba.com/product-detail/Stainless-Steel-Shell-And-Tube-Heat_1600488135739.html?spm=a2700.details.0.0.7a8b25f4NHuKV5> [consulta 2 de julio]
- [78] KAIDELI (2013) *Kaideli Water Cooled Condenser, Shell And Tube Heat Exchanger* <https://www.alibaba.com/product-detail/Water-Cooled-Condenser-Shell-Water-Cooled_60380624360.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.460c8a7fJNq1K6&cs=p> [consulta 2 de julio]
- [79] FERCO *Disipador de Calor Solar 7,2 kW FERCO ATS-81CU* <<https://tucalentador economico.es/disipador-de-calor-solar/2242-disipador-activo-ferco-ats-81cu.html>> [consulta 2 de julio]

Anexo A

Balance de masa y energía

En esta sección, se especifica el desarrollo realizado en el cálculo de balance de masa y energía para los casos de estudio.

A.1. Hidrógeno Verde - *Fuel Cell*

En la Tabla A.1 se muestran los parámetros utilizados para realizar los cálculos de balance de masa y energía del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Tabla A.1: Parámetros utilizados en el balance energético del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*.

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad	Referencia
Temperatura operación El	T_{El}	85	°C	[53]
Temperatura operación FC	T_{FC}	800	°C	[54]
Energía de entrada El	W_{El}	41.143	[kW-h]	Cálculo
Consumo energético El	E_{El}	4,4	[kW-h/ Nm^3]	[53]
Densidad H ₂	ρ_{h_2}	0,08988	[kgH ₂ / Nm^3]	[17]
Tiempo de almacenamiento	t_{alm}	10,00	[h]	Supuesto
Tiempo de suministro	t_{sum}	14,00	[h]	Supuesto
Porcentaje de recirculación	x_r	0,25	-	[40]
Voltaje de operación FC	V_{FC}	0,60	[V]	[54]
Densidad de corriente FC	j_{FC}	3.000	[A/ m^2]	[54]
Coefficiente de transferencia	α_e	2	[mol/mol eq]	[54]
Constante de Faraday	F	96.485	[C/mol eq]	[44]
Densidad de corriente El	j_{El}	4.000	[A/ m^2]	[53]
Voltaje de operación El	V_{El}	1,80	[V]	[53]

En la Tabla A.2 se muestran los resultados del balance de masa para el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*.

Tabla A.2: Resultados del balance de masa del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*.

Flujo	[mol/s]
$n_{H_2}^1$	11,67
$n_{H_2}^2$	11,67
$n_{H_2}^3$	8,33
$n_{H_2}^4$	11,12
$n_{H_2}^5$	11,12
$n_{H_2}^6$	11,12
$n_{H_2}^7$	2,77
$n_{H_2O}^7$	8,33
$n_{H_2}^8$	2,77
$n_{H_2O}^8$	8,33
$n_{H_2}^9$	2,77
$n_{H_2O}^9$	8,33
$n_{H_2}^{10}$	2,77
$n_{H_2O}^{10}$	8,33
$n_{H_2}^{11}$	2,77
$n_{H_2O}^{12}$	8,33
$n_{H_2O}^{13}$	11,67
$n_{H_2O}^{14}$	11,67
$n_{O_2}^{15}$	5,83
$n_{O_2}^{16}$	5,83
$n_{O_2}^{17}$	4,16
$n_{O_2}^{18}$	4,16
$n_{O_2}^{19}$	4,16

En la Tabla A.1 se muestran los resultados del balance de energía para el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*.

Tabla A.3: Resultados del balance energético del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*.

Parámetro	Magnitud	Unidad
Q_{El}	4.011.835	[W]
W_{C1}	37.773	[W]
W_{C2}	2.784	[W]
$h_{H_2}^4$	12.595	[W]
$h_{H_2}^5$	31.035	[W]
$h_{O_2}^{18}$	16.258	[W]
Q_{cal1}	3.730	[W]

Q_{cal2}	73.745	[W]
Q_{disp}	53.775	[W]
Q_{cond}	338.801	[W]
Q_{T3}	12.632	[W]
Q_{FC}	1.187.323	[W]
W_{FC}	965.358	[W]

En la Tabla A.4 se muestran las características termodinámicas de cada flujo presente en el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* [50].

Tabla A.4: Datos termodinámicos de cada flujo del sistema de Hidrógeno *Fuel Cell*

Flujo	T° C	P [bar]	H [kJ/mol]
$n_{H_2}^1$	80,00	9	10.060
$n_{H_2}^2$	196,00	200	13.296
$n_{H_2}^3$	196,00	1	13.296
$n_{H_2}^4$	163,28	1	12.595
$n_{H_2}^5$	773,53	1	31.035
$n_{H_2}^6$	800,00	1	31.371
$n_{H_2}^7$	800,00	1	31.371
$n_{H_2O}^7$	800,00	1	74.967
$n_{H_2}^8$	300,00	1	16.485
$n_{H_2O}^8$	300,00	1	55.341
$n_{H_2}^9$	240,00	1	14.735
$n_{H_2O}^9$	240,00	1	53.185
$n_{H_2}^{10}$	99,61	1	10.490
$n_{H_2O}^{10}$	99,61	1	48.150
$n_{H_2}^{11}$	99,61	1	10.490
$n_{H_2O}^{12}$	99,61	1	7.515
$n_{H_2O}^{13}$	85,00	9	6.433
$n_{H_2O}^{14}$	85,00	9	6.433
$n_{O_2}^{15}$	85,00	9	10.302
$n_{O_2}^{16}$	96,00	17	10.779
$n_{O_2}^{17}$	96,00	17	10.779
$n_{O_2}^{18}$	274,33	1	16.258
$n_{O_2}^{19}$	800,00	1	33.948

Anexo B

Datos del sistema

B.1. Cálculo de paneles solares

Los parámetros de entrada que se utilizan en el modelo de generación fotovoltaica son los parámetros estándar que propone el modelo, a excepción de ubicación exacta de la planta, la capacidad instalada de la plata, la capacidad del inversor, estos últimos parámetros corresponden a la capacidad instalada que requiera el sistema de Hidrógeno *Fuel Cell* o el de Baterías ion-Litio. Los parámetros estándar se presentan a continuación.

Tabla B.1: Parámetros estándar del modelo de generación fotovoltaica.

Descripción	Valor
Latitud	-26,6792
Longitud	-69,9382
Tipo de arreglo	Horizontal
Tipo de Montaje	Aislado
Eficiencia de inversor	96 %
Factor de pérdida	14 %

B.2. Planta Fotovoltaica

En la Tabla B.2 se muestra los datos del inventario de los paneles solares obtenidos de *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems 2020*.

Tabla B.2: Datos inventario de paneles solares.

Entrada	Magnitud	Unidad
Silicio	0,617	[kg/1 m ² de panel]
Aluminio	0,042	[kg/1 m ² de panel]
Cobre	0,103	[kg/1 m ² de panel]
Plomo	0,011	[kg/1 m ² de panel]
Plata	0,003	[kg/1 m ² de panel]
Estaño	0,013	[kg/1 m ² de panel]

Etilvinilacetato (EVA)	0,877	[kg/1 m ² de panel]
Película de fluoruro de polivinilo	0,112	[kg/1 m ² de panel]
Tereftalato de polietileno (PET)	0,347	[kg/1 m ² de panel]
Polietileno de alta densidad (HDPE)	0,023	[kg/1 m ² de panel]
Silicona	0,122	[kg/1 m ² de panel]
Vidrio Solar	8,504	[kg/1 m ² de panel]
Aleación de Aluminio	2,131	[kg/1 m ² de panel]

En la Tabla B.3 se presentan los datos de inventario para el inversor y transformador basados en la planta Springerville de 4,6 MWp (Tucson, EE. UU.), escalados a 1 MW de potencia nominal[52][51].

Tabla B.3: Datos de inventario para el inversor y transformador.

Entrada	Cantidad	Unidad
Aluminio	300	[kg/1 MW potencia]
Cobre	1656	[kg/1 MW potencia]
Acero	6756	[kg/1 MW potencia]
Polipropileno	300	[kg/1 MW potencia]

B.3. Hidrógeno *Fuel Cell*

Electrolizador

En la Tabla B.4 se presentan los datos de inventario para el electrolizador alcalino obtenidos del estudio G. Zhao *et al.* (International Journal of Hydrogen Energy, 2020)..

Tabla B.4: Datos de inventario del electrolizador alcalino.

Entrada	Cantidad	Unidad
Níquel	1,135	[1 m ² de celda]
Sulfuro de Níquel	0,04	[1 m ² de celda]
Níquel	1,135	[1 m ² de celda]
Sulfuro de Níquel	0,04	[1 m ² de celda]
Níquel	4,677	[1 m ² de celda]
Polisulfona	0,061	[1 m ² de celda]
Sulfuro de polifenileno	0,061	[1 m ² de celda]
Polisulfona	1,944	[1 m ² de celda]
Acero Inoxidable	2,328	[1 m ² de celda]
Acero	7,4	[1 m ² de celda]

Fuel Cell

En la Tabla B.5 se presentan los datos de inventario para el equipo *Fuel Cell*, obtenidos del estudio M. Gandiglio et al. (Energies 2019).

Tabla B.5: Datos de inventario del equipo *Fuel Cell* en la etapa de instalación.

Componente	Entrada	Cantidad	Unidad
Cátodo	LSM ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$)	1,070	[kg/ 1 m^2 de celda]
Cátodo	Circonia estabilizada con itria (YSZ)	0,248	[kg/ 1 m^2 de celda]
Cátodo	Butiral de polivinilo	0,081	[kg/ 1 m^2 de celda]
Cátodo	Acetato de n-butilo 99,5 %	0,244	[kg/ 1 m^2 de celda]
Cátodo	2-butoxietanol	0,031	[kg/ 1 m^2 de celda]
Cátodo	Carbón negro	0,053	[kg/ 1 m^2 de celda]
Cátodo	Methocel A4M	0,054	[kg/ 1 m^2 de celda]
Ánodo	Óxido de níquel	1,230	[kg/ 1 m^2 de celda]
Ánodo	Circonia estabilizada con itria (YSZ)	0,248	[kg/ 1 m^2 de celda]
Ánodo	Butiral de polivinilo	0,081	[kg/ 1 m^2 de celda]
Ánodo	Acetato de n-butilo 99,5 %	0,244	[kg/ 1 m^2 de celda]
Ánodo	2-butoxietanol	0,031	[kg/ 1 m^2 de celda]
Ánodo	Carbón negro	0,053	[kg/ 1 m^2 de celda]
Ánodo	Methocel A4M	0,054	[kg/ 1 m^2 de celda]
Electrolito	Circonia estabilizada con itria (YSZ)	0,248	[kg/ 1 m^2 de celda]
Electrolito	Butiral de polivinilo	0,081	[kg/ 1 m^2 de celda]
Electrolito	Acetato de n-butilo 99,5 %	0,244	[kg/ 1 m^2 de celda]
Electrolito	2-butoxietanol	0,031	[kg/ 1 m^2 de celda]
Electrolito	Carbón negro	0,053	[kg/ 1 m^2 de celda]
Electrolito	Methocel A4M	0,054	[kg/ 1 m^2 de celda]
Marco	Acero Inoxidable	4,811	[kg/ 1 m^2 de celda]
Marco	Óxido de aluminio	0,038	[kg/ 1 m^2 de celda]
Interconector	Acero Inoxidable	4,811	[kg/ 1 m^2 de celda]
Interconector	$\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_4$	0,122	[kg/ 1 m^2 de celda]
Celda	Acero	7,400	[kg/ 1 m^2 de celda]

Tanque de Almacenamiento

Para obtener el volumen que deben tener los tanques de almacenamiento, se calcula el volumen total de gas que se debe almacenar durante el tiempo de almacenamiento del sistema que corresponde a 10 [h]. El cálculo se realiza mediante la Ley de Gases Ideales, que se define en la siguiente ecuación.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{B.1})$$

Donde

P [atm]: Presión del gas.

V [L]: Volumen del gas.

n [mol]: Número de moles de la especie del gas.

R [$\frac{Latm}{molK}$]: Constante de las gases ideales.

T [K]: Temperatura del gas.

Considerando el cálculo del volumen del tanque de oxígeno como referencia, en la Tabla B.6 se tienen los parámetros utilizados en el cálculo.

Tabla B.6: Parámetros para el cálculo de volumen del tanque de almacenamiento de Oxígeno mediante gases ideales.

Parámetro	Valor	Unidad
Moles de O ₂	210.109,7	[mol]
Presión O ₂	16,77	[atm]
Temperatura O ₂	369,5	[K]
Constante R	0,082060	[$\frac{Latm}{molK}$]

Despejando y utilizando la ecuación B.1 se obtiene el siguiente resultado de volumen del tanque de oxígeno.

$$V_{T2} = 374.396,44[L] = 374,4[m^3] \quad (B.2)$$

El procedimiento es análogo para el cálculo del volumen del Tanque de Hidrógeno, los datos termodinámicos que se utilizan se muestran en la Tabla A.4.

Los datos de inventarios recopilados para los tanques de almacenamiento se obtienen a partir de cotizaciones en línea. El número de tanques requeridos depende del volumen de gas que se necesita almacenar. En la Tabla B.7 se presentan los datos de inventario mencionados [55] [56] [57].

Tabla B.7: Cálculo de número de Tanques de almacenamiento para el sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Equipo	Masa [kg]	Presión [bar]	V. Tanque [m3]	V. Flujo [m3]	N° de Tanque
Tanque 1	1.000	200	3	81,97	28
Tanque 2	14.640	17	100	374,4	4
Tanque 3	100	1	10	8	1

Equipos Secundarios

Los datos de inventario para los equipos secundarios se obtienen a partir de cotizaciones en línea. En la Tabla B.8 se presentan las dimensiones de los equipos cotizados.

Tabla B.8: Datos de inventario de los equipos secundarios del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Equipo	Masa	Unidad	Referencia
Compresor 1	1200	[kg/equipo]	[75]
Compresor 2	350	[kg/equipo]	[76]
Intercambiador de calor 1	450	[kg/equipo]	[77]
Intercambiador de calor 2	450	[kg/equipo]	[77]
Condensador	230	[kg/equipo]	[78]
Disipador de Calor	32	[kg/equipo]	[79]

B.4. Baterías ion-Litio

En la Tabla B.9 se presentan los datos de inventario para el electrolizador alcalino obtenidos del estudio Y. Liang *et al* (Resources, Conservation and Recycling 117 (2017) 285–293).

Tabla B.9: Datos de inventario de baterías ion-Litio.

Componente	Magnitud	Unidad	% de masa
LiFePO4	0,914	[kg/1000 kWh]	30,6 %
Acetylene black	0,183	[kg/1000 kWh]	6,1 %
Aluminio	0,004	[kg/1000 kWh]	0,1 %
Graphite (MCMB)	0,914	[kg/1000 kWh]	30,6 %
Acetylene black	0,183	[kg/1000 kWh]	6,1 %
Aluminio	0,014	[kg/1000 kWh]	0,5 %
Ethylene carbonate(EC)	0,054	[kg/1000 kWh]	1,8 %
Ethyl methyl carbonate(EMC)	0,135	[kg/1000 kWh]	4,5 %
LiPF6	0,291	[kg/1000 kWh]	9,7 %
Polyethylene membrane(PE)	0,001	[kg/1000 kWh]	0,0 %
Acero Inoxidable	0,298	[kg/1000 kWh]	10,0 %

Anexo C

Factores de emisión

Para estimar el factor de emisión del litio ferrofosfato ($LiFePO_4$), se multiplica el porcentaje de composición de cada elemento presente en el compuesto $LiFePO_4$ por el factor de emisión del elemento obtenido de la base de datos *Ecoinvent*, luego se suma las ponderaciones de los elementos y se obtiene una estimación del factor de emisión para el compuesto $LiFePO_4$. El porcentaje de composición de cada elemento en el cátodo $LiFePO_4$ de las baterías ion-Litio se obtienen del estudio L. Gaines *et al.* Life-Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling, (Argonne National Laboratory Argonne, IL 60439 (2010) [70]. En la Tabla C.1 se presentan los porcentajes de composición del material $LiFePO_4$ y los factores de emisión de cada uno de estos encontrados en la base de datos.

Tabla C.1: Estimación del factor de emisión del material litio ferrofosfato.

Elemento	%	MD [kgFe eq]	Cálculo	GWP [kgCO ₂ eq]	Cálculo
Li	4,9%	4,8	0,237	166,48	8,21
Fe	35,0%	1	0,350	2,02	0,71
PO ₅	60,1%	0,012	0,007	0,3503	0,21
		Estimación MD	0,594	Estimación GWP	9,13

Anexo D

Cuantificación de impacto

Se presenta la metodología de cálculo para la cuantificación del impacto ambiental según las categorías de impacto. En la ecuación D.1 se presenta el cálculo que se realiza para obtener la emisión GEI de las entradas al sistema.

$$Emisión\ GEI = Flujo\ de\ material\left[\frac{kg}{uF}\right] \cdot Factor\ de\ emisión\left[\frac{kgCO_2eq}{kg}\right] \quad (D.1)$$

Por otro lado, en la ecuación D.2 se presenta el cálculo que se realiza para obtener el Agotamiento de Recursos Minerales de las entradas al sistema.

$$Agotamiento\ de\ Recursos\ Minerales = Flujo\ de\ material\left[\frac{kg}{uF}\right] \cdot Factor\ de\ emisión\left[\frac{kgFe - eq}{kg}\right] \quad (D.2)$$

D.1. Hidrógeno *Fuel Cell*

En la Tabla D.1 se presentan los resultados de por macro etapa del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Tabla D.1: Resultados por macro etapa del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*

Macro Etapa	GWP [kgCO ₂]	MD [kg Fe-eq]
Instalación	4.635.148	4.038.306
Mantenimiento	1.434.487	1.566.052
Desmantelamiento	242.147	13.643

Instalación

En la Tabla D.2 se presentan el desglose de resultados de la macro etapa Instalación del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Tabla D.2: Resultados por etapa del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* en la macro etapa de Instalación

Instalación	GWP [kg CO₂eq]	MD [kg Fe-eq]
Fabricación Electrolizador Alcalino	59.102,94	73.053,22
Fabricación Tanque de Hidrógeno	50.208	79.836
Fabricación <i>Fuel Cell</i>	38.725	35.807
Fabricación Equipos Secundarios	246.753	755.722
Fabricación Paneles Solares	4.135.189,15	2.252.852,93
Fabricación Balance del Sistema	105.170,11	841.035,01
Transporte de Instalación	308.768,73	0

Mantenición

En la Tabla D.3 se presentan el desglose de resultados de la macro etapa Mantenición del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Tabla D.3: Resultados por etapa del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* en la macro etapa de Mantenición

Mantenición	GWP [kgCO₂eq]	MD [kg Fe-eq]
Reemplazo Fuel Cell	154.899	143.016
Reposición Paneles Solares	1.045.585	563.213
Reemplazo Equipos Secundarios	6.264	17.714
Reemplazo Balance del Sistema	105.170	841.035
Transporte Mantenición	103.524	0
Fin de Vida Mantenición	19.042	1.072

Desmantelamiento

En la Tabla D.4 se presentan el desglose de resultados de la macro etapa Desmantelamiento del sistema Hidrógeno *Fuel Cell*.

Tabla D.4: Resultados por etapa del sistema Hidrógeno *Fuel Cell* en la macro etapa de Desmantelamiento.

Desmantelamiento	GWP [kgCO₂eq]	MD [kg Fe-eq]
Fin de Vida Electrolizador	880,79	49,63
Fin de Vida Tanque Hidrógeno	1.525,55	85,95
Fin de Vida <i>Fuel Cell</i>	605,67	34,13
Fin de Vida Paneles Solares	230.875,27	13.008,37
Fin de Vida Equipos secundarios	3.228,54	181,91
Fin de Vida Balance del sistema	5.031,57	283,50

D.2. Baterías ion-Litio

En la Tabla D.5 se presentan los resultados por macro etapa del sistema Baterías ion-Litio.

Tabla D.5: Resultados por macro etapa del sistema Baterías ion-Litio.

Macro etapa	GWP [kgCO ₂ eq]	MD [kg Fe eq]
Instalación	3.486.457	2.149.853
Mantención	3.047.474	1.160.552
Desmantelamiento	36.483	2.056

Instalación

En la Tabla D.6 se presentan el desglose de resultados de la macro etapa Instalación del sistema Baterías ion-Litio.

Tabla D.6: Resultados de macro etapa Instalación para el sistema Baterías ion-Litio.

Instalación	GWP [kgCO ₂ eq]	MD [kg Fe eq]
Fabricación Baterías de ionLito	1.059.233	334.485
Fabricación Balance del Sistema	126.937	576.299
Fabricación Paneles Solares	2.300.288	1.239.069
Transporte Instalación	200.046	-

Mantención

En la Tabla D.7 se presentan el desglose de resultados de la macro etapa Mantención del sistema Baterías ion-Litio.

Tabla D.7: Resultados de macro etapa Mantención para el sistema de Baterías ion-Litio.

Mantención	GWP [kgCO ₂ eq]	MD [kg Fe eq]
Reemplazo Baterías de litio	2.169.185	272.954
Reposición Paneles Solares	575.072	309.767
Reposición Balance del Sistema	126.937	576.299
Transporte Mantención	149.090	0
Fin de Vida	27.190	1.532

Desmantelamiento

En la Tabla D.8 se presentan el desglose de resultados de la macro etapa Desmantelamiento del sistema Baterías ion-Litio.

Tabla D.8: Resultados de macro etapa Desmantelamiento para sistema de Baterías ion-Litio.

Desmantelamiento	GWP [kgCO₂eq]	MD [kg Fe eq]
Fin de Vida baterías	8.914,04	502,25
Fin de Vida Paneles solares	24.771,10	1.395,70
Fin de Vida Balance de Sistema	2.797,55	157,62