



**INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES NO
CONVENCIONALES, SOLAR FOTOVOLTAICA Y EÓLICA,
EN UN SISTEMA OFF-GRID PARA LA GENERACIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA E HIDRÓGENO VERDE EN CHILE**

RAÚL VALENTÍN BOUDET PEÑA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Dr. ROBERTO LEIVA ILLANES

PROFESOR CORREFERENTE: Dr. GERMÁN AMADOR DÍAZ

Agosto 2024



Resumen

Este trabajo examina la integración de energías renovables para la generación de energía eléctrica y la producción de hidrógeno verde mediante el excedente de generación en sistemas off-grid en Chile. Se desarrolló una herramienta de modelación y simulación para sistemas integrados que incluyen energía solar fotovoltaica, eólica, almacenamiento mediante baterías de ion-litio, electrolizadores tipo PEM y almacenamiento de hidrógeno. La metodología empleada consistió en definir parámetros operacionales y características de los componentes, realizar una modelación horaria de los flujos de energía, y llevar a cabo un análisis de prefactibilidad tecno-económico, calculando los costos nivelados de energía (LCOE) y de hidrógeno (LCOH). Se analizaron casos específicos para la Zona Norte, Centro-Sur y Austral de Chile.

Los resultados del estudio muestran que los LCOE oscilan entre 215-383 USD/MWh y los LCOH entre 10.0-16.8 USD/kgH₂, variando según la región y la configuración del sistema. Se identificó que los costos asociados al almacenamiento mediante baterías y a la generación de hidrógeno influyen directamente en los costos nivelados. Se anticipa que, con el desarrollo de tecnologías y la optimización de cadenas de producción, estos costos se reducirán. Aunque los LCOE y LCOH obtenidos son superiores a los del mercado general, esto se debe a la falta de economías de escala en los sistemas off-grid. No obstante, estas instalaciones son esenciales para áreas geográficas aisladas donde la expansión de la red eléctrica no es viable. En tales contextos, los sistemas off-grid emergen como una alternativa viable, ya que la geografía limita otras opciones de inversión energética.



Abstract

This work examines the integration of renewable energies for electricity generation and green hydrogen production using surplus generation in off-grid systems in Chile. A modeling and simulation tool was developed for integrated systems that include photovoltaic solar energy, wind energy, lithium-ion battery storage, PEM electrolyzers, and hydrogen storage. The methodology involved defining operational parameters and component characteristics, performing hourly energy flow modeling, and conducting a techno-economic prefeasibility analysis by calculating the levelized costs of energy (LCOE) and hydrogen (LCOH). Specific cases for the Northern, Central-Southern, and Southern regions of Chile were analyzed.

The study results indicate that LCOE ranges from 215-383 USD/MWh and LCOH from 10.0-16.8 USD/kgH₂, varying by region and system configuration. Costs associated with battery storage and hydrogen production significantly impact the levelized costs. It is anticipated that with technological advancements and optimization of production chains, these costs will decrease. Although the obtained LCOE and LCOH are higher than the general market, this is due to the lack of economies of scale in off-grid systems. Nevertheless, these installations are crucial for isolated geographic areas where extending the electrical grid is not feasible. In such contexts, off-grid systems emerge as a viable alternative, given that geography limits other energy investment options.



Índice

1.	Introducción	11
1.1.	Antecedentes	11
1.2.	Objetivos	15
2.	Estado del Arte	16
2.1.	Fuentes de Generación de Energía	16
2.2.	Energía Solar	17
2.3.	Energía Eólica	19
2.4.	Almacenamiento de Energía.....	21
2.5.	Generación de Hidrógeno.....	24
2.6.	Almacenamiento de Hidrógeno.....	28
2.7.	Sistemas Off-grid y On-grid.....	29
2.8.	Sistemas Integrados Off-Grid.....	31
3.	Metodología	35
3.1.	Casos a Analizar	37
3.2.	Zonas de Chile a Estudiar.....	40
3.3.	Modelado y Simulación Sistema Off-grid.....	48
3.4.	Dimensionamiento de Sistema Off-grid.....	56
3.5.	Calculadora online.....	58
4.	Resultados y discusión	67
4.1.	Resultados Generación Eléctrica e Hidrógeno Zona Norte.....	67
4.2.	Resultados Generación Eléctrica e Hidrógeno Zona Centro-Sur.....	73
4.3.	Resultados Generación Eléctrica e Hidrógeno Zona Austral.....	79
4.3	Resultados Económicos.....	85
5.	Conclusiones y recomendaciones finales	89
5.1.	Conclusiones	89



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

5.2. Recomendaciones finales	91
6. Referencias.....	92
Anexos	100
Anexo 1: Especificaciones Técnicas de Panel Fotovoltaico	100
Anexo 2: Especificaciones Técnicas Baterías de Ion-Litio.....	101
Anexo 3: Especificaciones Técnicas Electrolizador PEM.....	102
Anexo 4: Calculo LCOE	103
Anexo 5: Calculo LCOH.....	108



Índice de Tablas

Tabla 1: Costo total instalado, Factor de capacidad y costo energético nivelado para energías renovables.	13
Tabla 2: Clasificación de los tipos de almacenamiento de energía según requerimientos	22
Tabla 3: Características principales de los tres tipos de electrolizadores	26
Tabla 4: Comparación entre los tres tipos de electrolizadores	27
Tabla 5: Comparativa de distintas tecnologías de electrólisis CAPEX y eficiencia ...	28
Tabla 6: Coordenadas geográficas de ubicación zona norte a evaluar.	41
Tabla 7: Coordenadas geográficas de ubicación zona centro-sur a evaluar.	43
Tabla 8: Coordenadas geográficas de ubicación zona austral a evaluar.	46
Tabla 9: Perfil diario de consumo.	49
Tabla 10: Validación de los modelos utilizados	55
Tabla 11: Datos TMY de entrada para hoja “TMY-PV” Módulo Solar PV	59
Tabla 12: Especificaciones técnicas de entrada par ahoja “Panel Fotovoltaico” Módulo Solar PV.	60
Tabla 13: Parámetros de configuración y geográficos para hoja “Resultados” Módulo Solar PV.	61
Tabla 14: Parámetros de configuración y geográficos para hoja “Configuración” Módulo Eólico.	62
Tabla 15: Datos TMY de entrada para hoja “TMY-Eólico” Módulo Eólico.	63
Tabla 16: Parámetros entrada para hoja “Demanda” Módulo Demanda.	64
Tabla 17: Especificaciones técnicas de entrada para hoja “H2” Módulo Despacho. ..	65
Tabla 18: Especificaciones técnicas de entrada para hoja “Baterías y Grupo Electro” Módulo Despacho.	65
Tabla 19: Datos de entrada par ahoja “Flujo de Caja” Módulo Económico.	66
Tabla 20: Demandas mensuales, anual y almacenamiento Zona Norte.	67
Tabla 21: Resultados de Optimización de potencias instaladas y su corrección por ajuste horario Zona Norte.	68
Tabla 22: Generación mensual y anual de los Sistemas de Generación Zona Norte.	68



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Tabla 23: Generación anual, Demanda anual y Excedente de generación Zona Norte	69
Tabla 24: Producción de Hidrógeno Verde Zona Norte	73
Tabla 25: Demandas mensual, anual y almacenamiento Zona Centro-Sur	74
Tabla 26: Resultados de Optimización de potencias instaladas y su corrección por ajuste horario Zona Centro-Sur	74
Tabla 27: Generación mensual y anual de los Sistemas de Generación Zona Centro-Sur	75
Tabla 28: Generación anual, Demanda anual y Excedente de generación Zona Centro-Sur	76
Tabla 29: Producción de Hidrógeno Verde Zona Centro-Sur	78
Tabla 30: Demanda mensual, anual y almacenamiento Zona austral	79
Tabla 31: Resultados de Optimización de potencias instaladas y su corrección por ajuste horario Zona Austral	79
Tabla 32: Generación mensual y anual de los Sistemas de Generación Zona Austral	80
Tabla 33: Generación anual, Demanda anual y Excedente de generación Zona Austral	81
Tabla 34: Producción de Hidrógeno Verde Zona Austral	84
Tabla 35: Comparación de LCOE y Generación por Zonas y Casos	86
Tabla 36: Comparación LCOH, Generación de hidrógeno y cantidad de electrolizadores por Zonas y Casos	87



Índice de Figuras

Figura 1: Índice de desarrollo humano vs uso de energía eléctrica per cápita.	12
Figura 2: Capacidad instalada energías renovables periodo 2010-2021.....	13
Figura 3: Generación histórica de Chile periodo 1996-2020 en GWh.	14
Figura 4: Tipos de paneles fotovoltaicos	18
Figura 5: Aerogenerador eje vertical	20
Figura 6: Aerogenerador eje axial.....	21
Figura 7: Rangos de Tipos de Almacenamiento según potencia y tiempos de descarga.	22
Figura 8: Comparativo entre tecnologías de almacenamiento densidad de potencia y energía.....	23
Figura 9: Aplicaciones del hidrogeno verde en la industria.	24
Figura 10: Proceso de producción de hidrogeno verde a partir de electricidad.....	25
Figura 11: Esquema instalación sistema híbrido off-grid	30
Figura 12: Esquema instalación basado en hidrógeno	31
Figura 13: Esquema instalación basado en generación de hidrógeno y solar	32
Figura 14: Esquema instalación basado en generación solar, eólica y diésel	32
Figura 15: Esquema instalación basado en generación solar y baterías	33
Figura 16: Esquema instalación basado en generación solar, eólica y baterías.....	33
Figura 17: Esquema del sistema.	35
Figura 18: Diagrama de operación sistema.....	36
Figura 19: Caracterización de recursos renovables Eólico y Solar fotovoltaico.	40
Figura 20: Mapa con ubicación de lugar seleccionado Zona Norte.....	41
Figura 21: Perfil de radiación global incidente anual en plano de celdas fotovoltaicas Zona Norte	42
Figura 22: Perfil de velocidad del viento anual Zona Norte.....	42
Figura 23: Velocidades promedio de cada mes Zona Norte.....	43
Figura 24: Mapa con ubicación de lugar seleccionado Zona Centro-Sur.....	44
Figura 25: Perfil de radiación global incidente anual en plano de celdas fotovoltaicas Zona Centro-Sur	44



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Figura 26: Perfil de velocidad del viento anual Zona Centro-Sur	45
Figura 27: Velocidades promedio de cada mes Zona Centro-Sur.	45
Figura 28: Mapa con ubicación de lugar seleccionado Zona Austral.	46
Figura 29: Perfil de radiación global incidente anual en plano de celdas fotovoltaicas Zona Austral.	47
Figura 30: Perfil de velocidad del viento anual Zona Austral	47
Figura 31: Velocidades promedio de cada mes Zona Austral	48
Figura 32: Circuito equivalente para una celda solar.	50
Figura 33: Curva potencia vs velocidad del viento entregada por fabricantes.	52
Figura 34: Metodología seguida para dimensionamiento de Generación de Hidrógeno	57
Figura 35: Demandas mensuales, Generación mensual Eólica y Solar Fotovoltaica Zona Norte.	69
Figura 36: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 14 de junio para Caso Base Zona Norte.	70
Figura 37: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 14 de junio para Caso Optimizado Zona Norte.	70
Figura 38: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 15 de diciembre para Caso Base Zona Norte.	71
Figura 39: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 15 de diciembre para Caso Optimizado Zona Norte.	71
Figura 40: Demandas mensuales, Generación mensual Eólica y Solar Fotovoltaica Zona Centro-Sur.	75
Figura 41: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 14 de junio para Caso Base y Optimizado Zona Centro-Sur.	76
Figura 42: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 15 de diciembre para Caso Base y Optimizado Zona Centro-Sur.	77
Figura 43: Demandas mensuales, Generación mensual Eólica y Solar Fotovoltaica Zona Austral.	80
Figura 44: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 14 de junio para Caso Base Zona Austral.	82



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Figura 45: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 14 de junio para Caso Optimizado Zona Austral.	82
Figura 46: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 15 de diciembre para Caso Base Zona Austral.	83
Figura 47: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 15 de diciembre para Caso Optimizado Zona Austral.	83



1. Introducción

1.1. Antecedentes

Las sociedades modernas enfrentan el desafío de asegurar un futuro energético sostenible, ya que la falta de planificación podría dar lugar a problemas significativos de energía. Asumir que la energía estará disponible en el futuro, sin una estrategia clara, pone en riesgo el bienestar de las generaciones venideras. En Chile, buscar mayores niveles de bienestar personal y colectivo requiere implementar lineamientos y estrategias para el futuro energético [1].

El acceso a la energía eléctrica es crucial en la persecución de metas de desarrollo económico y social, siendo fundamental para satisfacer las expectativas de progreso humano. El acceso a la electricidad influye directamente en la productividad, salud, educación y otros aspectos clave de la vida. Las Naciones Unidas utilizan el Índice de Desarrollo Humano como métrica para evaluar el nivel de desarrollo de los países. En el caso de Chile tiene un índice con un valor de 0.855 al año 2021 y un consumo de energía per cápita de 4.175 kWh. La Figura 1 muestra la relación directa entre el bienestar y el consumo de energía eléctrica per cápita [2].

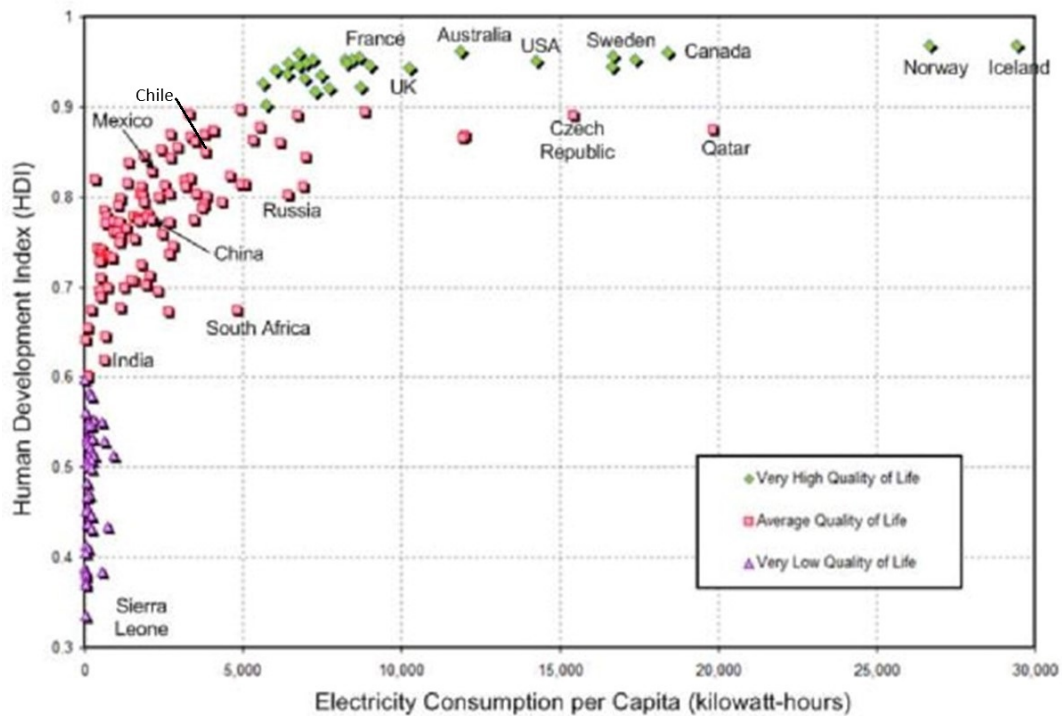


Figura 1: Índice de desarrollo humano vs uso de energía eléctrica per cápita. [2]

Por otro lado, el informe “World Energy Outlook” de la Agencia Internacional de Energía [3], en su edición de 2022, destaca que el mundo enfrenta su primera crisis energética global. La reciente situación geopolítica ha acentuado las presiones del mercado, elevando considerablemente los precios de la energía. Este escenario pone en riesgo los mercados energéticos, subrayando la fragilidad de nuestro sistema energético. Ante este panorama las energías renovables emergen como una alternativa crucial, porque son una oportunidad para las regiones con mayor proporción de estas energías, ya que permitirán un acceso a la energía a precios más bajos.

1.1.1. Matriz Energética Mundial

El consumo mundial de energía ha experimentado un crecimiento constante, impulsado por factores como el crecimiento económico y el aumento de la población. Aunque el petróleo sigue siendo dominante, las energías renovables han ganado terreno, representando un 1% en el año 2000 y para el año 2021 un 8% del consumo mundial, según el informe estadístico de energía del mundo elaborado por la BP [4]. La Figura 2 muestra el crecimiento de la capacidad instalada de tecnologías de generación de energías renovables,



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

destacando la solar fotovoltaica y la eólica, que han adquirido mayor participación en el mercado.

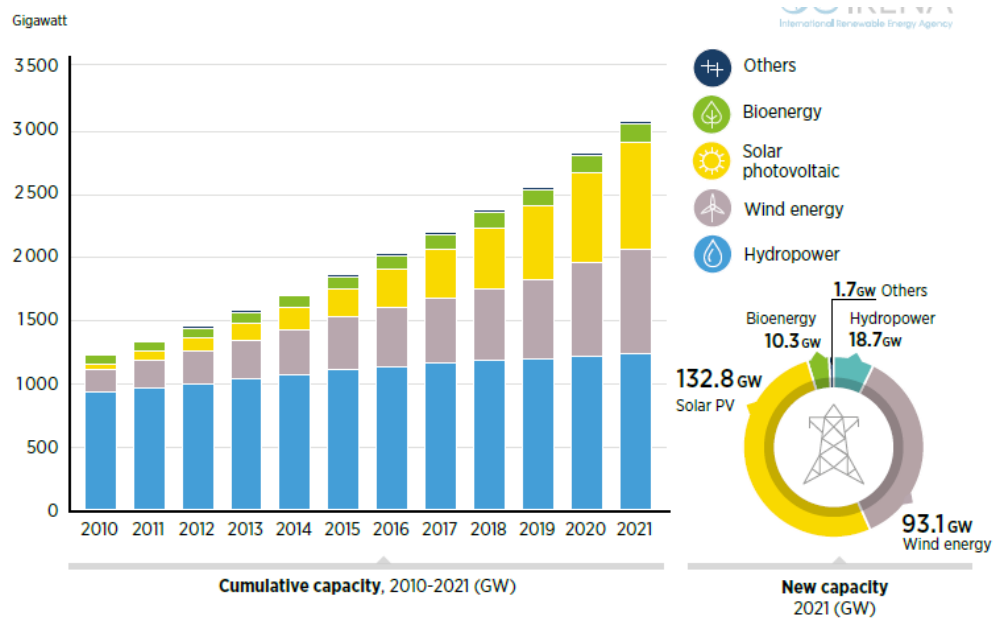


Figura 2: Capacidad instalada energías renovables periodo 2010-2021 [5].

La disminución en los costos de producción ha impulsado este aumento, como se evidencia en la Tabla 1.

Tabla 1: Costo total instalado, Factor de capacidad y costo energético nivelado para energías renovables. (Elaborado a partir de [5])

	Costo Total Inst.			Factor de capacidad			Costo nivelado de la energía		
	(2021 USD/kW)			%			(2021 USD/kW)		
	2010	2021	Δ %	2010	2021	Δ %	2010	2021	Δ %
Bioenergía	2,714	2,353	-13%	72	68	-6%	0.078	0.067	-14%
Geotérmica	2,714	3,991	47%	87	77	-11%	0.05	0.068	34%
Hidroeléctrica	1,315	2,135	62%	44	45	2%	0.039	0.048	24%
Solar PV	4,808	857	-82%	14	17	25%	0.417	0.048	-88%
CSP	9,422	9,091	-4%	30	80	167%	0.358	0.114	-68%
Eólica Terrestre	2,042	1,325	-35%	27	39	44%	0.102	0.033	-68%
Eólica Marítima	4,876	2,858	-41%	38	39	33%	0.188	0.075	-60%



1.1.2. Contexto Nacional

Chile, con sus abundantes recursos naturales, presenta un enorme potencial para la integración de energías renovables en su matriz energética y ha demostrado un compromiso significativo con la transición hacia fuentes sostenibles de energía. Esto se evidencia con el fuerte aumento de la participación de las energías renovables en el mercado energético, como muestra la Figura 3, y fomentándolo con políticas públicas como la Ley 20,698 de Fomento a las Energías Renovables No Convencionales [6].

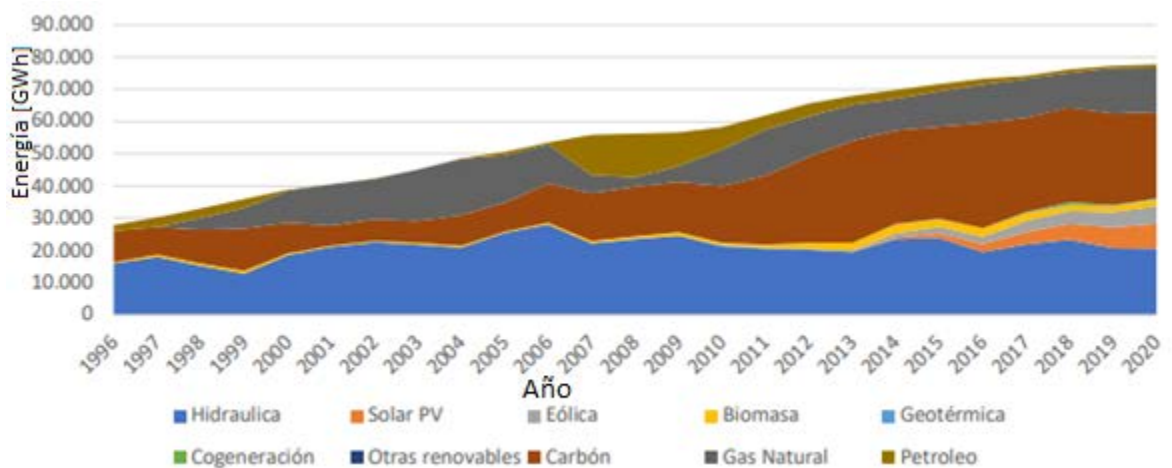


Figura 3: Generación histórica de Chile periodo 1996-2020 en GWh.[7]

Dado este contexto de importancia de la generación de energía en nuestra vida y su relación establecida con el desarrollo humano, así como el crecimiento en la participación de las energías renovables, especialmente la energía solar fotovoltaica y eólica en Chile, se presentan a continuación los objetivos de esta memoria.



1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo General*

Desarrollar un modelo que permita evaluar en términos tecno-económicos la generación de energía eléctrica e hidrógeno verde en Chile en sistemas off-grid, considerando el uso de energía solar fotovoltaica y eólica.

1.2.2. *Objetivo Específicos*

- Modelar y simular sistemas integrados solar fotovoltaico, eólico y electrolizadores, operando en un esquema off-grid para distintas zonas de Chile.
- Realizar un análisis tecno-económico para determinar a partir de qué potencia instalada, la generación eléctrica y de hidrógeno verde como sistema de respaldo, son viables en un sistema off-grid para distintos perfiles de demanda y zonas de Chile.
- Desarrollar una calculadora on-line que permita dimensionar y evaluar tecno-económicamente, a nivel de perfil, proyectos de generación eléctrica e hidrógeno verde como sistema de respaldo para instalaciones off-grid.



2. Estado del Arte

2.1. Fuentes de Generación de Energía

La energía, en su esencia, se define como la propiedad física que se manifiesta de diversas maneras y puede transformarse y transferirse entre sistemas, representando la capacidad para realizar trabajo o inducir cambios en el entorno. La clasificación de las fuentes de energía se realiza según su disponibilidad en la naturaleza, distinguiendo entre fuentes renovables o no renovables [8].

La elección entre fuentes renovables y no renovables tiene implicaciones cruciales para la sostenibilidad y la mitigación del impacto ambiental. En este contexto, la integración de energías renovables, no solo para la generación de electricidad sino también para la producción de hidrógeno verde, se presenta como una estrategia clave en la búsqueda de un futuro energético sostenible [8].

2.1.1. Fuentes de Generación No Renovables

- Energía térmica convencional: Se basa en la combustión de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural para generar calor. La energía térmica producida se emplea para impulsar turbinas, convirtiendo este trabajo en electricidad.
- Energía nuclear: La energía nuclear surge mediante la fisión nuclear, donde el núcleo de un átomo se divide, liberando una considerable cantidad de energía en forma de calor. Este calor se aprovecha para generar vapor, impulsar turbinas y generar electricidad.

2.1.2. Fuentes de Generación Renovables

- Energía hidroeléctrica: Se aprovecha el flujo o la caída del agua para generar electricidad. La construcción de represas en ríos permite almacenar y liberar agua, la cual, al pasar por turbinas, convierte la energía cinética en electricidad.
- Energía eólica: Esta fuente emplea la fuerza del viento para hacer girar las aspas de los aerogeneradores. La rotación resultante facilita la transformación de la energía cinética en electricidad a través de un generador.



- Energía solar: Se obtiene a partir de la radiación solar, utilizando dos enfoques principales: Paneles solares fotovoltaicos que convierten la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, y la energía solar térmica que utiliza la radiación solar para generar vapor, el cual, al utilizarse en turbinas produce electricidad.
- Energía de biomasa.: Esta fuente utiliza materia orgánica y su descomposición para generar material combustible, empleado posteriormente en plantas térmicas de generación eléctrica.
- Energía geotérmica: Aprovecha la energía térmica proveniente del interior de la Tierra. Mediante la extracción de calor, se genera electricidad a través de turbinas

2.2. Energía Solar

Uno de los factores de los que depende la generación de energía solar fotovoltaica es la radiación global incidente, la cual refiere a la radiación total que incide sobre una superficie [9].

Fuentes de Datos Radiación Solar en Chile. Existen distintas fuentes de información disponibles con los datos de la radiación solar a lo largo del país. Una de ellas es el Explorador Solar del Ministerio de Energía, que se encuentra a libre disposición con información detallada sobre el recurso solar en Chile. Los datos del explorador se calculan a partir de datos recolectados entre los años 2004 a 2016.

Con esta información, recolectada sobre la radiación solar disponible geográficamente a lo largo del año, se dimensiona y proyecta la generación de instalaciones de generación solares de todos los tamaños [10].



2.2.1. Paneles Solares Fotovoltaico

Los paneles solares fotovoltaicos, transforman la energía solar en energía eléctrica, utilizando el efecto fotoeléctrico de materiales semiconductores.

Tipos de Paneles Solares Fotovoltaicos: Los paneles solares fotovoltaicos difieren por su estructura cristalina.

- **Monocrystalino:** Compuesto por celdas monocrystalinas, tienen un color intenso negro. Aunque más costosos debido a su proceso de fabricación, poseen una mayor eficiencia.
- **Policristalinos:** Formados por celdas policristalinas, tienen un color azulado oscuro. Suelen ser más baratos y menos eficientes que los monocrystalinos.
- **Capa fina:** Difiere totalmente de los otros dos tipos, corresponde a celda cortada a medida. Presentan una eficiencia menor que ambos paneles anteriormente mencionados.



Figura 4: Tipos de paneles fotovoltaicos [11].



Tipo de Estructura Montaje Paneles Solares Fotovoltaicos: Las estructuras de montaje para paneles fotovoltaicos juegan un rol importante en el rendimiento de la generación de energía, dividiéndose en estructuras fijas y móviles.

Estructura Fija. La más utilizada en instalaciones de menor potencia, debido a su menor costo.

Estructura Móvil. Pretende maximizar la producción ajustando el ángulo de incidencia de la radiación solar durante el día. Este seguimiento de la trayectoria solar puede ser en uno y dos ejes, siendo este último más eficiente, pero con mayores costos, generalmente se utiliza en generación a gran escala [12].

2.3. Energía Eólica

La energía eólica, generada indirectamente por la energía solar, proviene de las diferencias de temperatura y la rotación del planeta, dando origen al viento. Aunque la energía eólica global es enorme, solo una fracción es explotable, Según Elrich (2013) [8], se estima en aproximadamente 300 millones de GWh. Si se requiriese revisar en más detalle los fundamentos de la energía Eólica se puede observar en el Anexo 5.

Fuentes de Datos Energía Eólica en Chile. Existen varias fuentes de energía eólica disponibles con la información a lo largo del país. Una de ellas es el Explorador Eólico del Ministerio de Energía, que se encuentra a libre disposición con información detallada sobre el recurso eólico en Chile. Esta información recolectada sobre la energía eólica disponible geográficamente durante el año se usa para dimensionar y proyectar instalaciones de aerogeneradores de todos los tamaños [13].



2.3.1. Aerogeneradores

Los aerogeneradores son los equipos encargados de transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica. Existen de diferentes tipos, tamaños y números de aspas. La clasificación principal se basa en la orientación del eje de rotación, dividiéndose en turbinas verticales axiales y horizontales axiales. En las Figuras 5 y 6 se pueden observar ambos tipos.

Las turbinas eólicas de eje vertical presentan ventajas, al compararlas con las de eje horizontal como: no necesitan ser orientadas en la dirección del viento; Y no tienen tensiones cíclicas producidas por la gravedad que ocurren con cada rotación de las palas [8].

Pero la gran desventaja que tienen los aerogeneradores de eje vertical es la necesidad de un sistema complejo de cables de sujeción que estabilizan la torre. Sin la instalación de los cables se producen resonancias que eventualmente producirían fatiga. El problema del montaje de estos cables es el gran espacio que requieren para ser instaladas, por lo que espacialmente son muy demandantes. Por eso los aerogeneradores de eje horizontal son los más utilizados en el mercado.



Figura 5: Aerogenerador eje vertical [14]



Figura 6: Aerogenerador eje axial [15]

2.4. Almacenamiento de Energía

El almacenamiento de energía es crucial en sistemas de energía renovable por su producción y demanda muy variable. Los sistemas off-grid, al estar aislados de la red eléctrica, dependen de un adecuado almacenamiento para satisfacer la demanda, en especial cuando las fuentes de generación no están activas o disponibles [8].

Para seleccionar el tipo de almacenamiento adecuado, se deben considerar las características del sistema eléctrico y del consumo. Si es un sistema de alta potencia, los sistemas de almacenamiento deben asegurar la continuidad del servicio y la calidad de la energía. En cambio, si se requiriese para sistemas de generación distribuida se busca que el almacenamiento de energía pueda entregarla durante un intervalo de tiempo considerable, cuando el sistema de generación de energía no pueda suministrar la demanda del sistema o no esté generando. En la Tabla 2, se observa la clasificación de almacenamiento según la aplicación y requerimientos que deba tener el sistema, siendo de alta potencia o energía [16-19]



Tabla 2: Clasificación de los tipos de almacenamiento de energía según requerimientos [16].

←←←←Alta Potencia		Alta Energía→→→→	
Aplicaciones de calidad de potencia y continuidad de servicio		Aplicaciones de administración de energía	
Tiempos extra rápidos (seg)	Tiempos rápidos (min)	Tiempos lentos (horas)	
Compensación del efecto de parpadeo (flicker). Corrección de hundimiento de tensión.	Reserva rodante. Sistema de alimentación ininterrumpida. Black start. Control de potencia activa y reactiva.	Nivelado de carga. Integración con fuentes renovables de energía. Operación aislada. Comercialización.	

Tipos de Almacenamientos. En la Figura 7, se presentan los tipos de almacenamiento de energía según la demanda de potencia y los tiempos de descarga.

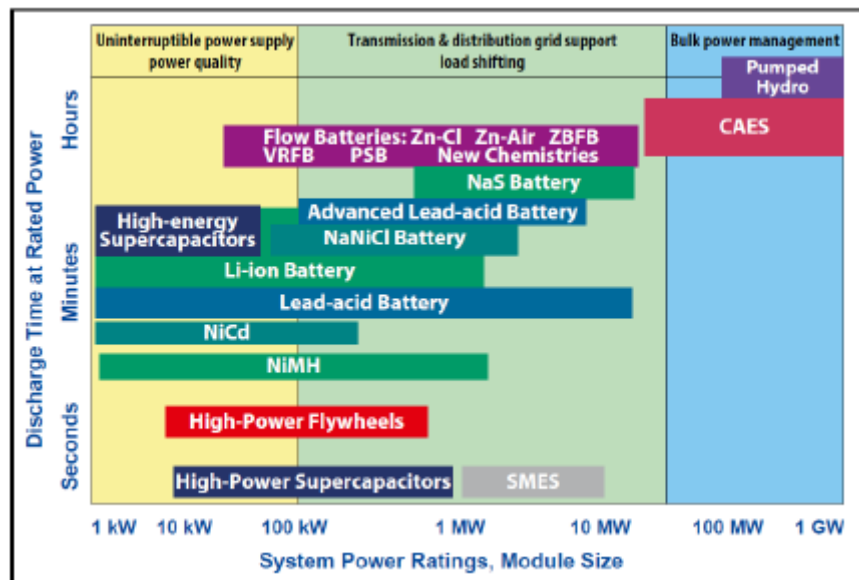


Figura 7: Rangos de Tipos de Almacenamiento según potencia y tiempos de descarga. [17].

Esta clasificación ofrece una guía sobre los rangos óptimos de operación para cada tecnología de almacenamiento, considerando la potencia y el tiempo de descarga. La densidad de energía es un factor crítico, ya que una alta densidad implica menores volúmenes, siendo un aspecto importante en instalaciones donde el espacio es limitado. En la Figura 8 se comparan las tecnologías de almacenamiento en densidad de potencia y energía.

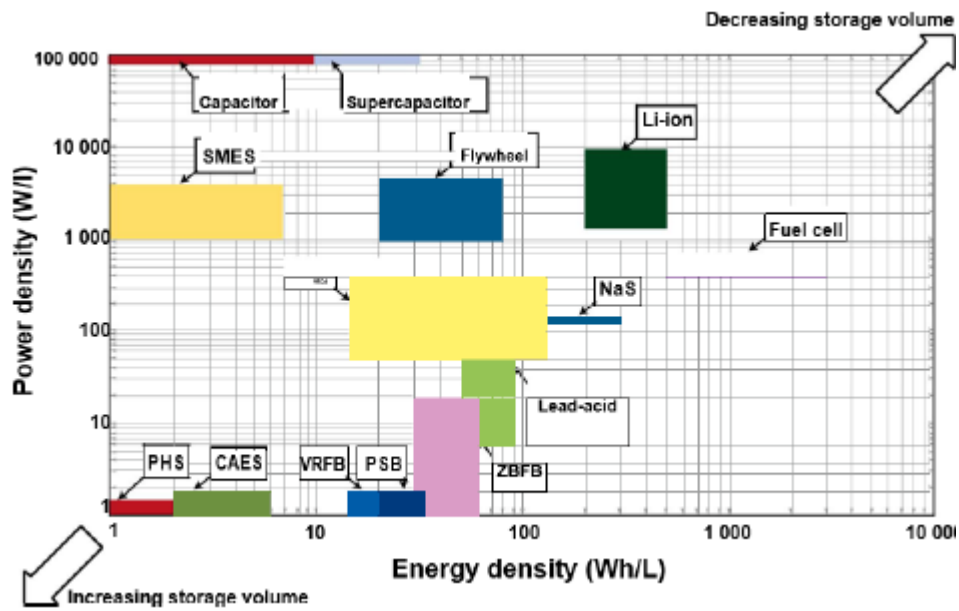


Figura 8: Comparativo entre tecnologías de almacenamiento densidad de potencia y energía [17].

En la Figura 7 se puede observar, que la batería de Ion-Litio tiene un amplio rango de operación de potencia y un rango de descarga variado desde los minutos a las horas y en la Figura 8 presenta una densidad energética alta con respecto a la potencia. De esta manera, este tipo de batería es utilizado en variadas aplicaciones y en especial en sistemas de generación Off-grid como el que se analizará en este documento [18].

2.5. Generación de Hidrógeno

La necesidad de enfrentar el cambio climático y los problemas ambientales derivados del consumo de combustibles fósiles ha llevado a la búsqueda de alternativas que reemplacen a estos combustibles como principales fuentes de energía. El hidrógeno emerge como una solución versátil, aplicable en diversas áreas, desde la industria hasta el transporte, como se muestra en la Figura 9.

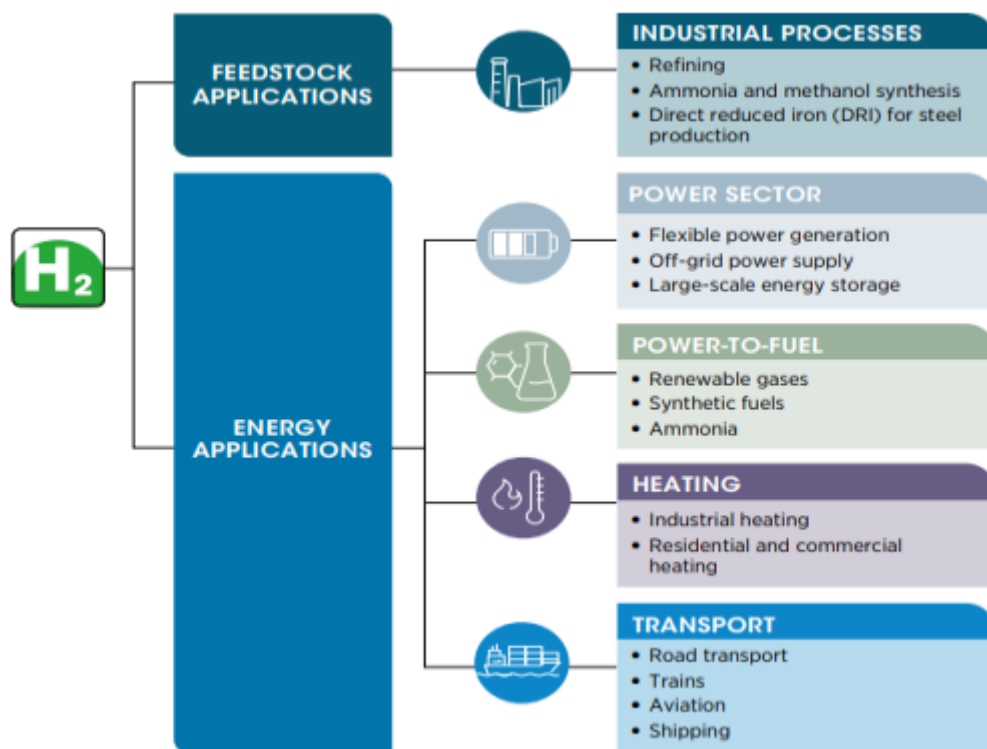


Figura 9: Aplicaciones del hidrógeno verde en la industria [20].

Desde la perspectiva ambiental, el hidrógeno solo generaría emisiones de óxidos de nitrógeno durante la combustión; sin embargo, en aplicaciones como las celdas de combustible de hidrógeno, no se producen emisiones. La producción de hidrógeno puede llevarse a cabo mediante diversas fuentes de energía y se clasifica en varios tipos por colores, se mencionarán tres de ellos [21].

- **Hidrógeno Verde:** Procede de la electrólisis del agua, pero utiliza electricidad procedente de fuentes de energía renovable.
- **Hidrógeno Azul:** Es producido a partir del gas natural, pero se minimizan las emisiones gracias a la captura de carbono.
- **Hidrógeno Gris:** Es generado por gas natural o petróleo sin captura de carbono.

El hidrógeno verde ha ganado gran importancia debido a sus beneficios medioambientales y el compromiso con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

En la Figura 10, se presentan el proceso de producción de hidrógeno con aporte de electricidad, que es de interés de estudio para efectos de esta memoria.

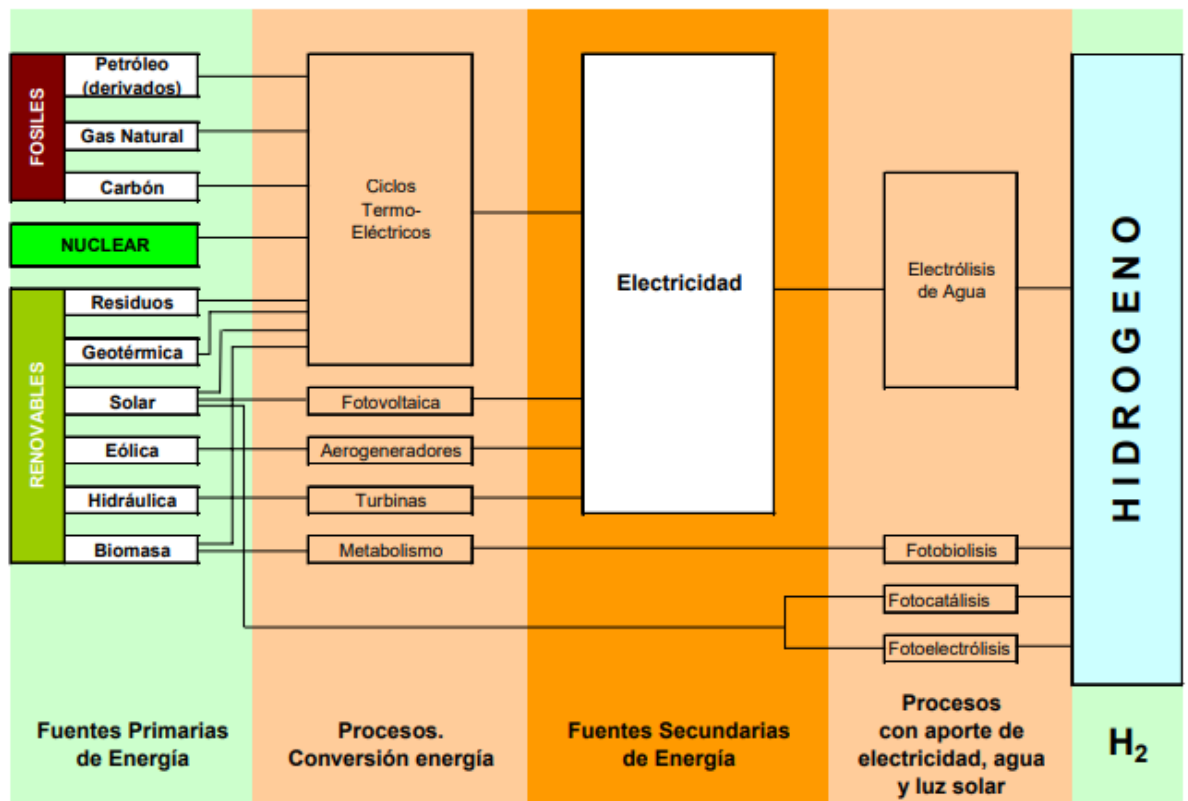


Figura 10: Proceso de producción de hidrógeno verde a partir de electricidad. [22]

Dado que el proceso por el cual se produce hidrógeno verde con aporte de electricidad es por electrólisis del agua, se debe estudiar las diferentes tecnologías disponibles para ello.



2.5.1. Tipos de Electrolizadores

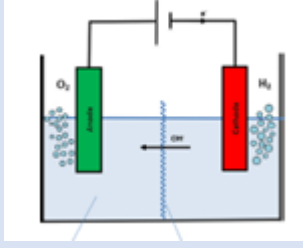
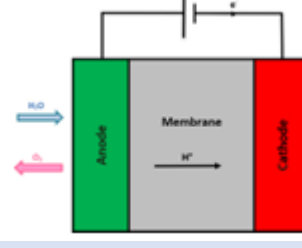
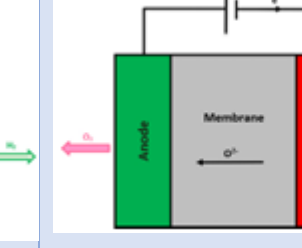
Existen tres tipos de electrólisis: Alcalino, Ácida (PEM) y Oxido Sólido (SOEC) [23]. En la Tabla 3 se presentan las principales ventajas y desventajas de cada tecnología.

Tabla 3: Características principales de los tres tipos de electrolizadores (Elaborado a partir de [23]).

Alcalina	PEM	SOEC
Ventajas		
Tecnología bien establecida.	Altas densidades de corriente.	Eficiencia hasta 100%.
Catalizador no noble.	Eficiencia a alto voltaje.	Eficiencia mayor a 100% vapor caliente.
Estabilidad a largo plazo	Buen rango de carga parcial.	Catalizador no noble.
Costo relativamente bajo	Respuesta rápida del sistema.	Operación a alta presión.
En el rango de MW	Diseño de sistema compacto.	
	Funcionamiento dinámico de alta pureza del gas	
Desventajas		
Bajas densidades de corriente.	Alto costo de los componentes.	Etapas de laboratorio.
Grado de pureza de gases.	Ambiente ácido corrosivo.	Diseño de sistema voluminoso.
Bajo rango de carga parcial.	Posiblemente baja durabilidad.	Durabilidad.
Bajas presiones operativas.	Comercialización	No hay información de costos confiable.
Electrolito líquido corrosivo	Bajo el rango del MW	

Las fuentes de generación eléctrica que se utilizarán en este trabajo son variables dada su dependencia por elementos climáticos, se debe buscar una tecnología con un amplio rango de operación. En la tabla 4, se presentan las principales características de los tres tipos de electrolizadores [24].

Tabla 4: Comparación entre los tres tipos de electrolizadores (Elaborado a partir de [24]).

	Alcalina	PEM	SOE
Operating Diagram			
Electrolito	KOH o NaOH (liquido)	Polímero (Solido)	Cerámico (Solido)
Temperatura (°C)	60-90	50-90	500-1000
Presión (bar)	2-10	15-30	<30
Portador de carga	OH^-	H^+	O^{2-}
Reacción catódica	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2$	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$
Reacción anódica	$2OH^- \rightarrow H_2O + 2e^- + \frac{1}{2}O_2$	$H_2O \rightarrow 2H^+ + 2e^- + \frac{1}{2}O_2$	$O^{2-} \rightarrow 2e^- + \frac{1}{2}O_2$
Voltaje Celda (V)	1.8-2.4	1.8-2.2	0.7-1.5
Densidad de Corriente (A/cm2)	0.2-0.4	0.2-0.6	0.3-1
Eficiencia (%)	60-80	80	>90
Capacidad H2 (Nm3/h)	<70	<40	<40
Ciclo vida de stack (h)	<90,000	<20,000	<40,000
Ciclo de vida del sistema (años)	20-30	10-20	-



2.5.2. Eficiencia y Costos de Electrolizadores

La Tabla 3, presenta la eficiencia eléctrica y costos de los electrolizadores, desde la actualidad hasta lo que se espera en un futuro. Si bien hoy, los electrolizadores tipo PEM poseen mayores costos que los alcalinos, en el futuro se espera que estos costos se reduzcan considerablemente.

Tabla 5: Comparativa de distintas tecnologías de electrólisis CAPEX y eficiencia [21].

	Electrolizador Alcalino			Electrolizador PM			Electrolizador SOEC		
	2024	2030	Largo Plazo	2024	2030	Largo Plazo	2024	2030	Largo Plazo
Eficiencia Eléctrica (%LHV)	63-70	65-71	70-80	56-60	63-68	67-74	74-81	77-84	77-90
CAPEX (USD/kWe)	500	400	200	1100	650	200	2800	800	500
	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	1,400	850	700	1,800	1,500	900	5,600	2,800	1,000

2.6. Almacenamiento de Hidrógeno

Las opciones de almacenamiento de hidrógeno incluyen gas, líquido, amoníaco y líquidos orgánicos. El almacenamiento gaseoso, el método más común, presenta cuatro tipos de estanques a presión: Tipo I (pesado, acero), Tipo II (reforzado con compuestos), Tipo III (Delgado, aluminio con fibra de carbono) y Tipo IV (Capa interna de plástico). Los tipos III y IV son ligeros pero costosos, utilizados principalmente en aplicaciones móviles, mientras que los tipos I y II se usan en almacenamiento estacionario [25].

El almacenamiento líquido por otro lado requiere depósitos criogénicos, presenta pérdidas debido a la evaporación del hidrógeno y mayores distancias de seguridad debido a las grandes presiones a las que el hidrógeno entra en fase líquida. El amoníaco, obtenido a partir de hidrógeno, es una opción con ventajas y desafíos, como la conversión energética y consideraciones de seguridad. Los líquidos orgánicos son similares a gasolina y diésel,



almacenándose en depósitos convencionales, donde el metanol es la opción más económica [24].

2.7. Sistemas Off-grid y On-grid

En los ítems 2.2 y 2.3 se realizó la descripción o caracterización de las fuentes de energía solar y eólica de la teoría que se aplica, y de los equipos encargados de transformar la energía de las fuentes a energía eléctrica. La integración de los equipos de transformación con otros equipos auxiliares, permiten implementar sistemas que permiten aprovechar la energía producida.

La principal distinción en las instalaciones de generación solar fotovoltaica y eólica es definir si operarán de manera integrada o aislada de la red eléctrica. Esto es fundamental para seleccionar los equipos auxiliares que se requerirán.

Los sistemas conectados a la red eléctrica pública tienen por nombre on-grid y los completamente aislados corresponden a los off-grid, que requieren una fuente de almacenamiento para satisfacer los consumos en forma continua [25].

2.7.1. Sistemas On-grid

Este tipo de sistemas están conectados a la matriz energética, y de esta manera pueden generar y consumir la energía de generación que dispongan. Considerando que toda la energía que no sea consumida por el sistema se lo llevará la red eléctrica recibiendo pagos por la energía vendida y, si no se genera suficiente, la red inyectará al sistema lo que se necesite. De esta manera, en los sistemas on-grid la red eléctrica actúa como el sistema de almacenamiento [25].

2.7.2. Sistemas Off-grid

Estos sistemas se encuentran aislados de la red y no depende de ella para suministrar energía eléctrica, por lo que la principal diferencia entre un sistema off-grid y uno on-grid, es el sistema de respaldo de energía. En el caso de los off-grid son los sistemas de almacenamiento y generación por combustible fósil. Y en el caso de los sistemas on-grid es la matriz energética [25].

2.8. Sistemas Integrados Off-Grid

En el estudio de Valverde et al. [27] trata sobre una microgrid basado en celdas de combustible para la producción sostenible de energía e hidrógeno. Donde los autores hablan sobre el encendido y apagado de las celdas de combustible según el nivel de carga del almacenamiento de las baterías, y las celdas de combustible suministran la energía a aplicaciones domésticas para evitar la descarga excesiva de la batería. En la Figura 12 se detalla el sistema estudiado.

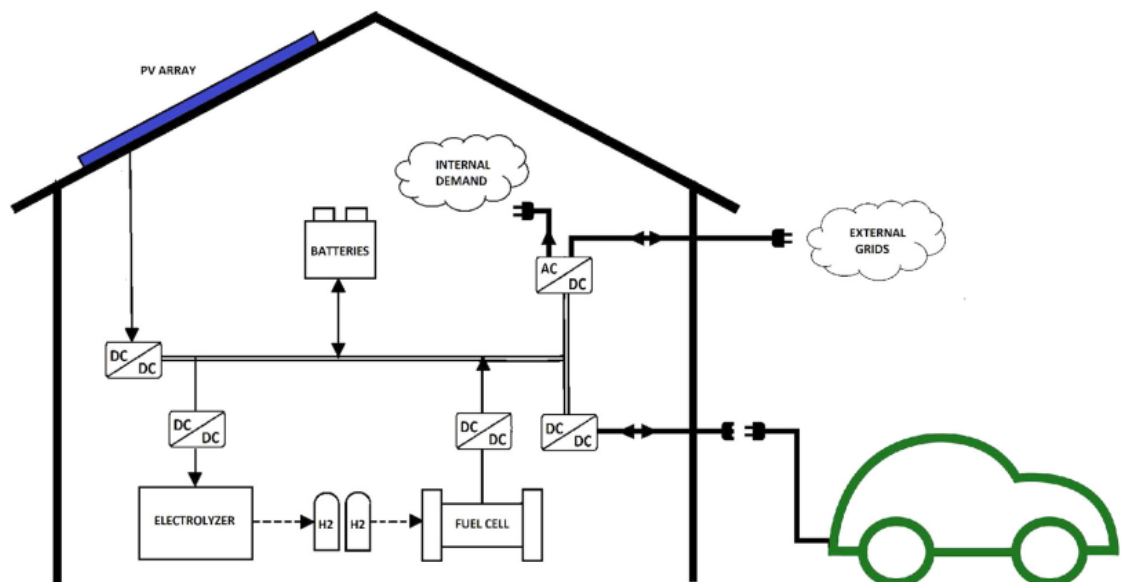


Figura 12: Esquema instalación basado en hidrógeno [27]

Por otro lado, en el estudio de Singh et al. [28] Se analiza un sistema híbrido con generación solar y celdas de combustibles, sin almacenamiento por baterías. Donde la generación de hidrógeno se utiliza exclusivamente para la generación de energía. En la Figura 13 muestra el esquema de conexión utilizado.

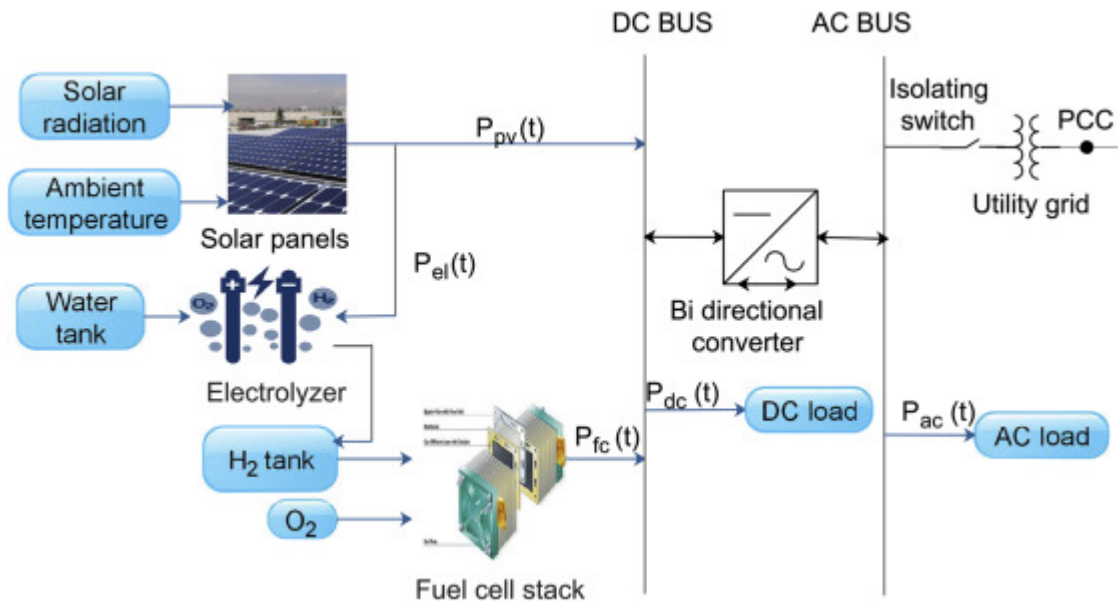


Figura 13: Esquema instalación basado en generación de hidrógeno y solar [28]

Otro sistema estudiado de integración de energías para la producción de hidrógeno lo presenta la investigación Harish et al. [29]. Donde se concentra en la aplicación de un sistema de generación solar/eólico/diésel para dar cobertura a las demandas en un contexto rural. En la Figura 14, se presenta el esquema de la instalación estudiada.

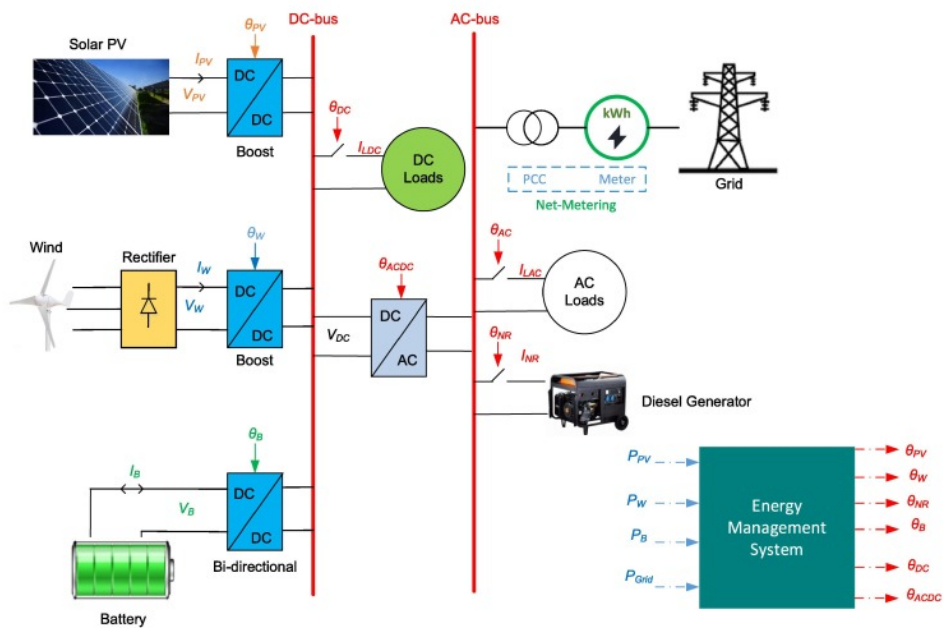


Figura 14: Esquema instalación basado en generación solar, eólica y diésel [29]

En la investigación de Hassan et al. [30], se presenta la revisión de sistemas híbridos de energía renovable solar fotovoltaico y eólico. Donde presenta los principales retos y oportunidades que se deben resolver. Se detalla que el surgimiento de los sistemas híbridos de generación con el fin de suplir la intermitencia que poseen dada las condiciones geográficas y climáticas de los lugares, con el fin de maximizar la eficiencia y la confiabilidad. En las Figura 15 y 16 se presentan los sistemas off-grid estudiados.

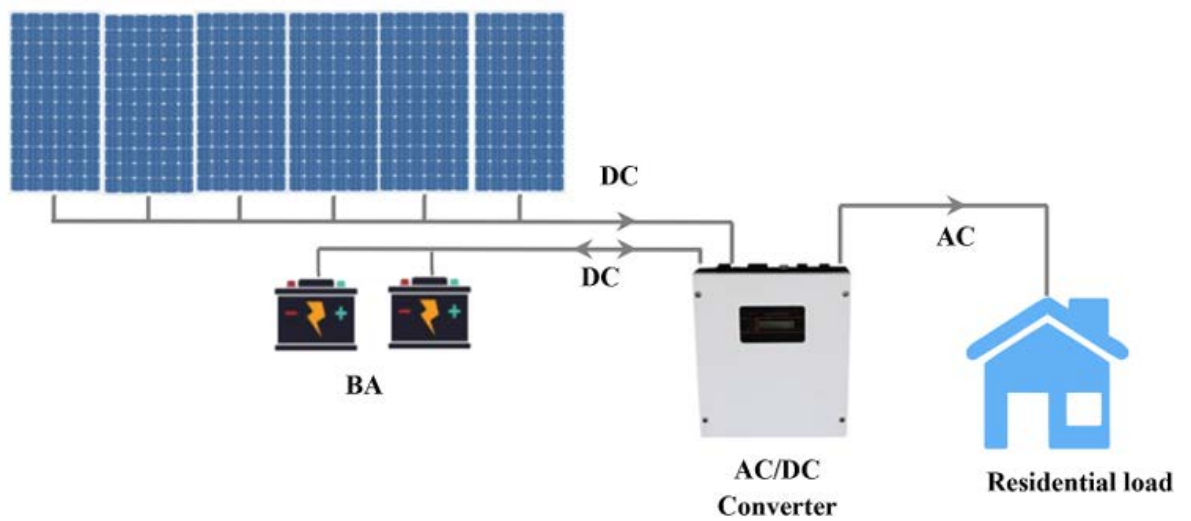


Figura 15: Esquema instalación basado en generación solar y baterías [30]

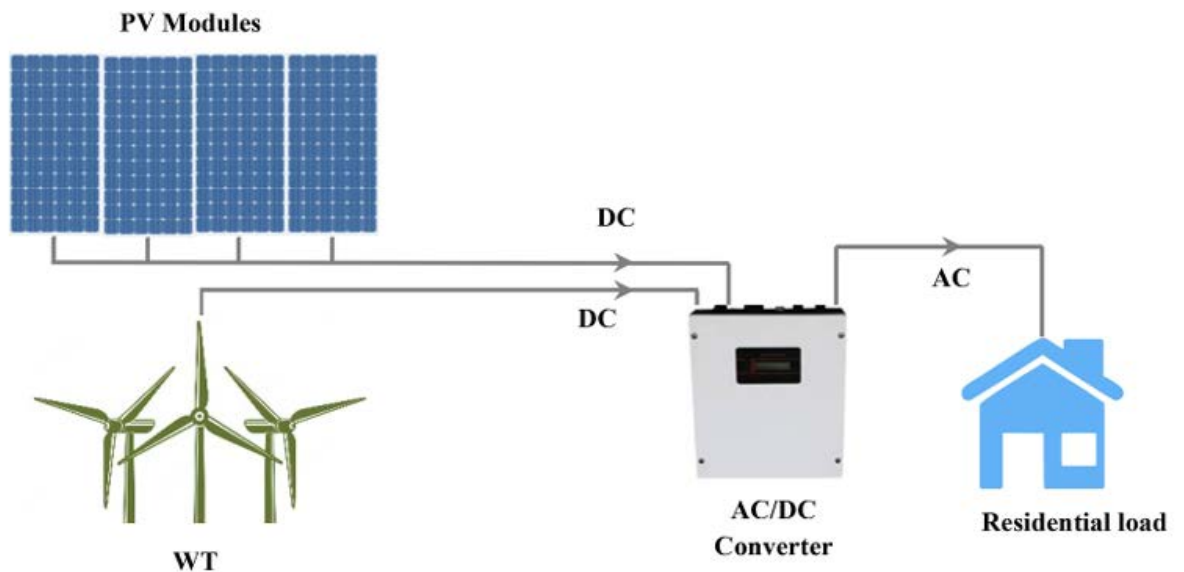


Figura 16: Esquema instalación basado en generación solar, eólica y baterías [30]



2.9. Brechas detectadas

En la presente investigación se observa la variedad de tecnologías que se pueden integrar a un sistema de generación, donde en varias investigaciones se analizan los rendimientos técnicos y económicos de diversas energías. No hay una herramienta que permita poder realizar evaluaciones técnico y económicas en múltiples escenarios para sistemas de generación eólicos, solares, almacenamiento, por combustible fósil y la generación de hidrógeno verde.

Si bien existen diversos programas y calculadoras como: PVSyst para instalaciones solares; SAM solar y eólico; Explorador Solar, Eólico y Hidrogeno Verde; o la calculadora de generación de hidrógeno verde hecha por Fraunhofer orientadas a la producción por energía solar; Ninguna de ellas integra todas las tecnologías para realizar estudios en distintas zonas, dado su potencial energético.

De esta manera, el objetivo de esta investigación es poder generar una herramienta que permita integrar las tecnologías de generación solar fotovoltaico, eólico, de hidrógeno y almacenamiento a nivel de prefactibilidad para poder evaluar proyectos de generación de energía eléctrica e hidrógeno verde en un sistema off-grid.

3. Metodología

Se plantea y modela un sistema integrado de generación solar fotovoltaica y eólica, junto con almacenamiento de energía mediante baterías y producción de hidrógeno verde. El esquema de la instalación se presenta en la Figura 17. Este sistema se diseña de tal manera que priorice el suministro de energía eléctrica directamente a la demanda eléctrica actual (En Figura 17, líneas rojas), mientras que el excedente de generación eléctrica será dirigido hacia la carga de baterías para su posterior uso. Solo cuando las baterías estén completamente cargadas y exista excedente de energía eléctrica disponible, se activará el proceso de electrolisis para la producción de hidrógeno verde (En Figura 17, líneas verdes).

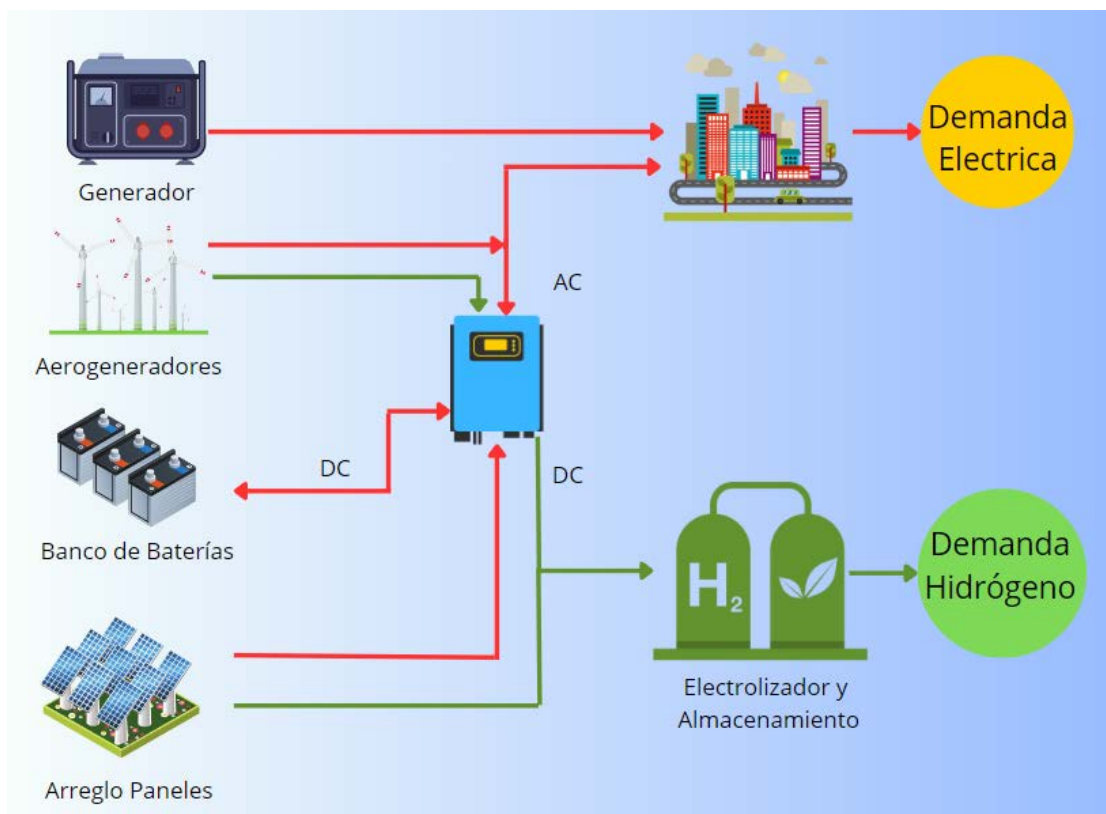


Figura 17: Esquema del sistema (Elaboración propia).

En la Figura 18 se exhibe el diagrama de decisión del sistema de generación, el cual establece una secuencia lógica para manejar la distribución de energía. En primera instancia, se determina si la cantidad de energía generada supera la demanda eléctrica. Si este no es el caso, se procede a verificar el estado de carga de las baterías. En el evento de que las baterías estén descargadas, el generador diésel entra en funcionamiento para satisfacer la demanda energética. Sin embargo, si las baterías están cargadas, estas contribuyen a cubrir la demanda eléctrica sin necesidad de recurrir al generador diésel.

Por otro lado, si existe un excedente de generación eléctrica, el sistema verifica el estado de carga de las baterías. Si las baterías no están completamente cargadas, se prioriza la recarga de las mismas. En caso de que las baterías ya estén cargadas, el nivel del estanque de hidrógeno determina si los electrolizadores pueden ser utilizados para la producción de hidrógeno verde.

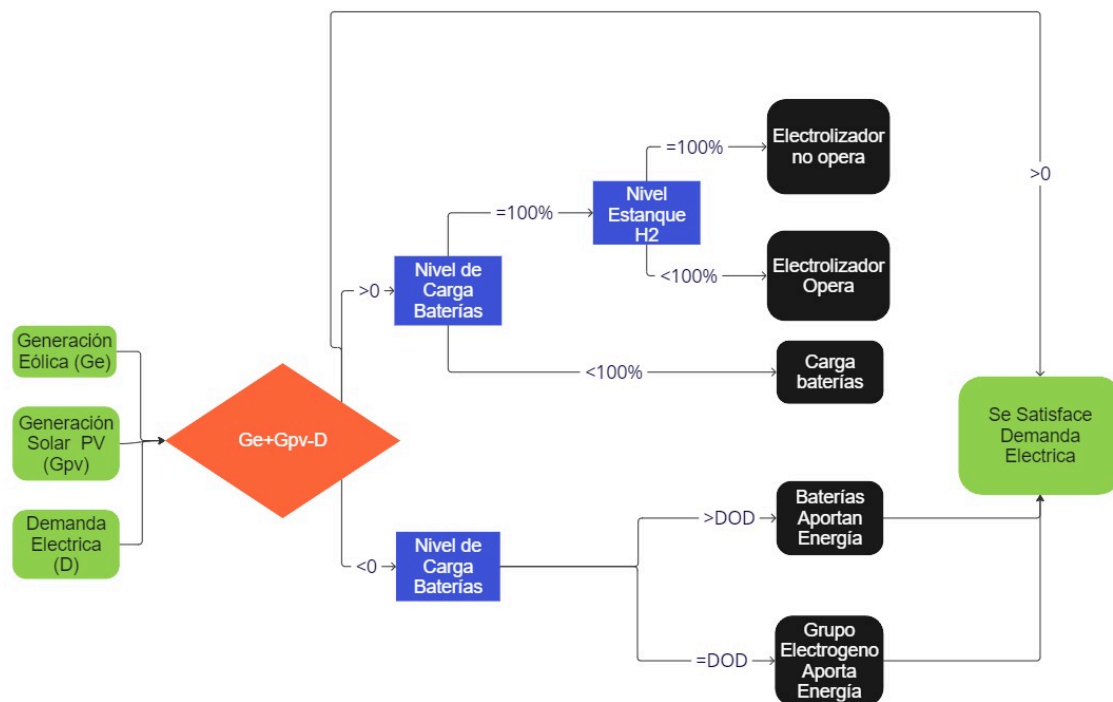


Figura 18: Diagrama de Despacho del sistema (Elaboración Propia).



3.1. Casos a Analizar

Para obtener resultados comparativos, se abordarán dos tipos de casos. El primero corresponde al caso base, que corresponde a un sistema definido, donde se determinó la potencia instalada y su distribución de energía solar y eólica para satisfacer la demanda de 30 hogares en la comuna de Calera de Tango, Región Metropolitana en base a una cuenta de CGE. El segundo, es el caso optimizado con respecto al costo donde el sistema que se dimensiona cumple con la demanda horaria determinada en el caso base para cada.

Se evaluará el sistema de generación off-grid con almacenamiento de energía mediante baterías y para producción de hidrógeno.

I. Caso Base:

Se establecerá una potencia instalada fija de 360 kW, asignando una potencia de 180 kW para la generación solar fotovoltaica y eólica. A partir de estas potencias, se determinará la producción de energía eléctrica que el sistema es capaz de generar. Esta producción se tomará como la demanda que el sistema puede satisfacer, según el potencial energético de la zona analizada.

Además, dado que se trata de sistemas off-grid, se garantizará una autonomía de 2 días para el banco de baterías en caso de que no haya producción de energía. También se contemplará un sistema de respaldo basado en combustibles fósil para suplir la demanda en caso de que no haya energía para aportar de las otras fuentes, donde se establece por criterio que no debe superar las 100, con un límite óptimo de 96 horas duplicando la autonomía de las baterías. De esta manera, orientar la instalación a mantener un rango de utilización de energía renovable en el sistema lo más cercana al 100%, entendiendo que habrá días donde puede no haber generación y excedan la autonomía de las baterías.

El sistema de generación de hidrógeno estará compuesto por 3 electrolizadores, cada uno con una potencia de 10kW. Junto con un tanque de almacenamiento con capacidad de 50m³ a 30 bar, donde se asume que en caso de llenarse se vacía por venta del hidrógeno, de manera que los electrolizadores puedan funcionar siempre que haya excedente de energía.



II. Caso Optimizado:

Dado que el potencial energético varía en cada zona evaluada, se determinará la potencia instalada necesaria para satisfacer la demanda horaria establecida en el caso base para cada ubicación. Además, se establecerá que debe existir participación de cada fuente de energía de un 30% en la potencia instalada, con el objetivo de asegurar un sistema híbrido de generación y su participación sea importante dentro de la generación. Este sistema se optimizará de manera de minimizar los costos de inversión y operación, garantizando la satisfacción de la demanda de energía y que el excedente anual que exista sea utilizado por los electrolizadores sea cercano al 50%, con el fin de representar un consumo energético considerable por los electrolizadores y su generación de valor con respecto al excedente que se estaría perdiendo.

El modelo de optimización tiene el objetivo de encontrar las potencias instaladas y su distribución entre tecnologías que minimicen los costos y cumplan con la demanda de energía anual. La optimización se realiza calculando las generaciones anuales de energía, ingresando las potencias obtenidas a la calculadora de generación desarrollada para verificar que el sistema pueda satisfacer la demanda horaria del sistema, junto a la restricción de uso del grupo electrógeno. Si se cumple esta condición, se ajustará la cantidad de electrolizadores de 10kW para que utilicen un valor cercano al 50% del excedente de energía anual. En caso contrario, se aumentará la potencia instalada para cada tecnología de generación hasta cumplir con la demanda horaria bajo la misma restricción, y luego se ajustará la cantidad de electrolizadores para cumplir con el requisito de uso del excedente de energía. El modelo de optimización se presenta a continuación.

Parámetros:

P_{Venta}: Precio de venta de la electricidad en USD/kWh.

C_{Inv,Baterías}: Costo de inversión del almacenamiento por baterías en USD/kWh.

C_{Inv,Solar}: Costo de inversión de la energía solar en USD/kWp.

C_{Inv,Eólica}: Costo de inversión de la energía eólica en USD/kWp.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

$C_{Op,Baterías}$: Costo de operación del almacenamiento por baterías en USD/kWh.

$C_{Op,Solar}$: Costo de operación de la energía solar en USD/kWp.

$C_{Op,Eólica}$: Costo de operación de la energía eólica en USD/kWp.

F_{Solar} : Factor de plan de la energía solar.

$F_{Eólica}$: Factor de plan de la energía eólica.

D : Demanda total de energía anual en kWh.

$P_{Baterías}$: Capacidad instalada de baterías en kWh.

Q_{Solar} : Participación de la energía solar.

$Q_{Eólica}$: Participación de la energía eólica.

Variables de decisión:

P_{Solar} : Potencia instalada de paneles solares en kWp.

$P_{Eólica}$: Potencia instalada de aerogeneradores en kWp.

Función Objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Min } C_T = & C_{Inv,Solar}P_{Solar} + C_{Inv,Eólica}P_{Eólica} + C_{Inv,Baterías}P_{Baterías} \\ & + C_{Op,Solar}P_{Solar} + C_{Op,Eólica}P_{Eólica} + C_{Op,Baterías}P_{Baterías} \\ & - DP_{Venta} \end{aligned} \quad (Ec. 1)$$

Restricciones:

$$(P_{Solar}F_{Solar} + P_{Eólica}F_{Eólica})8760[h] \geq D \quad (Ec. 2)$$

$$\left(\frac{P_{solar}}{P_{solar} + P_{Eólica}} \right) \geq 0,3 \quad (Ec. 3)$$

$$\left(\frac{P_{Eólica}}{P_{solar} + P_{Eólica}} \right) \geq 0,3 \quad (Ec. 4)$$

3.2. Zonas de Chile a Estudiar

Para determinar las ubicaciones geográficas objeto de análisis en esta memoria, se emplea la identificación y cuantificación de potenciales de energías renovables realizada en el año 2021 por Vásquez et al. [31] La Figura 19, exhibe los potenciales energéticos a lo largo de Chile, destacando los potenciales de generación solar fotovoltaica y eólica.

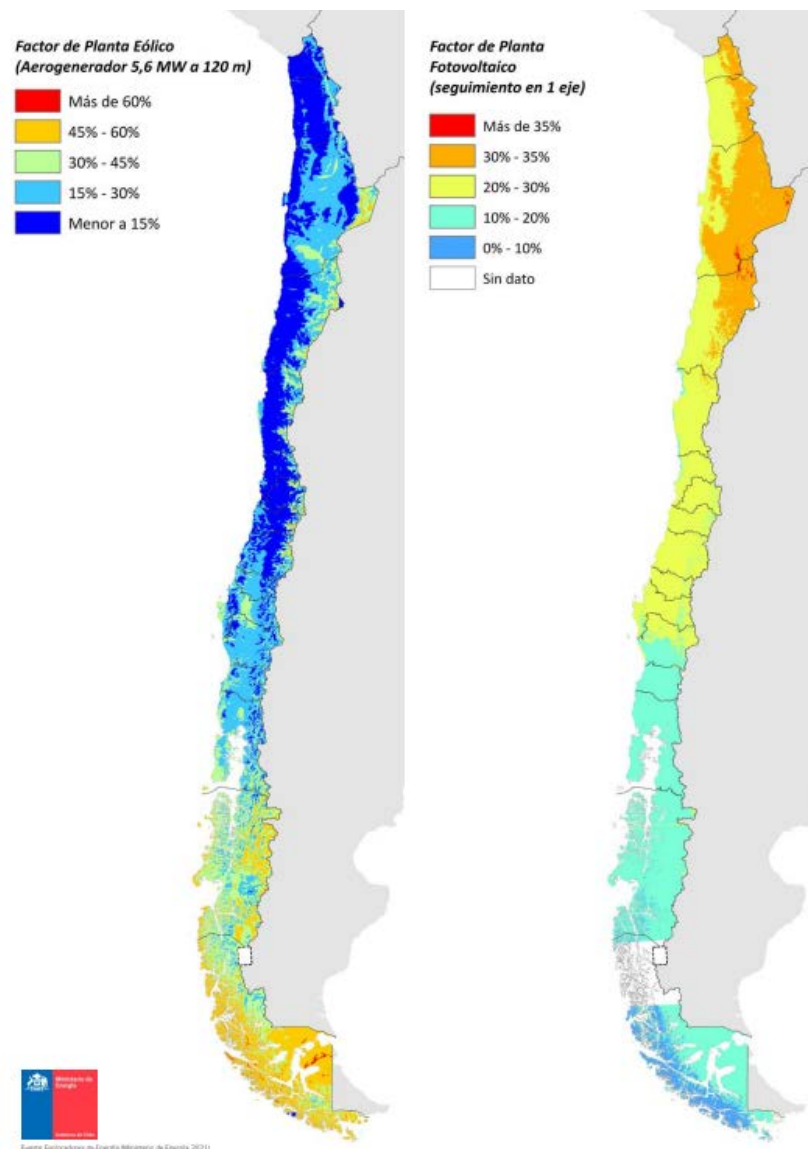


Figura 19: Caracterización de recursos renovables Eólico y Solar fotovoltaico.[31]



En esta memoria se enfocará el análisis en tres zonas específicas: Zona Norte, Zona Centro-Sur y Zona Austral.

3.2.1. Zona Norte

Observando la Figura 19, se identifica que la Zona Norte, tiene un gran potencial en generación eólica y solar fotovoltaica, principalmente en la región de Antofagasta, y presenta factores de planta elevados. La ubicación geográfica seleccionada para el análisis es cercana a Balmaceda. Sus coordenadas se presentan en la Tabla 5, y ubicación en el mapa se muestran en la Figura 20, y en los párrafos siguientes se presentan los perfiles de radiación y viento para esta ubicación.

Tabla 6: Coordenadas geográficas de ubicación zona norte a evaluar.

Latitud	Longitud	m.s.n.m
-25.0961402	-69.5712401	2,775

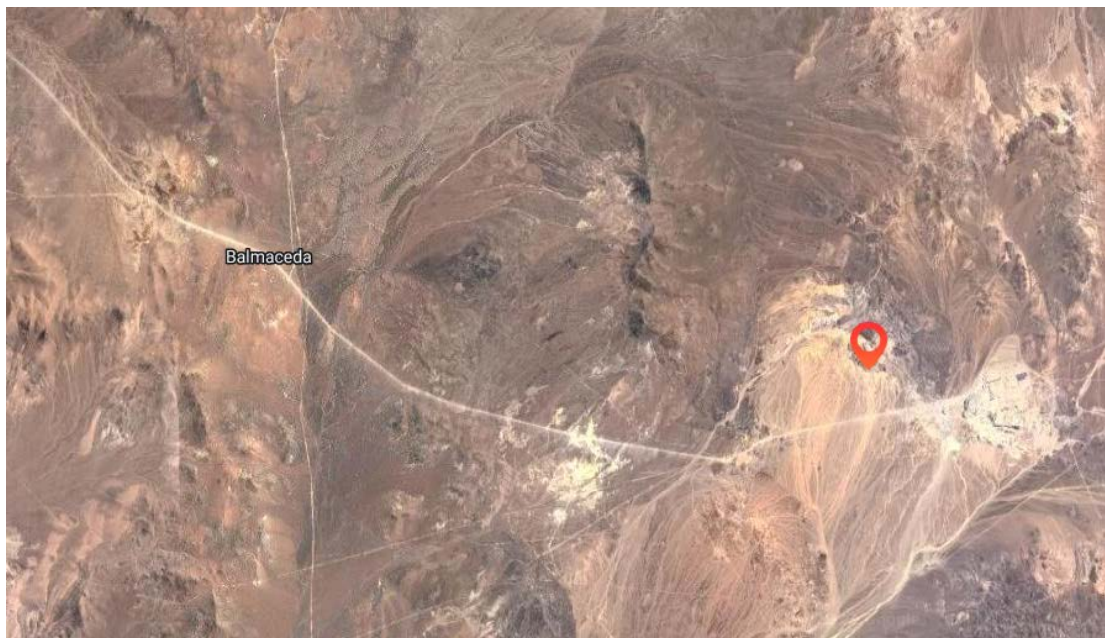


Figura 20: Mapa con ubicación de lugar seleccionado Zona Norte (Fuente: Explorador Solar [10]).



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

En la Figura 21, se presenta la radiación global en el plano de los paneles fotovoltaicos a lo largo del año, con orientación norte e inclinación de 25° con respecto a la horizontal.

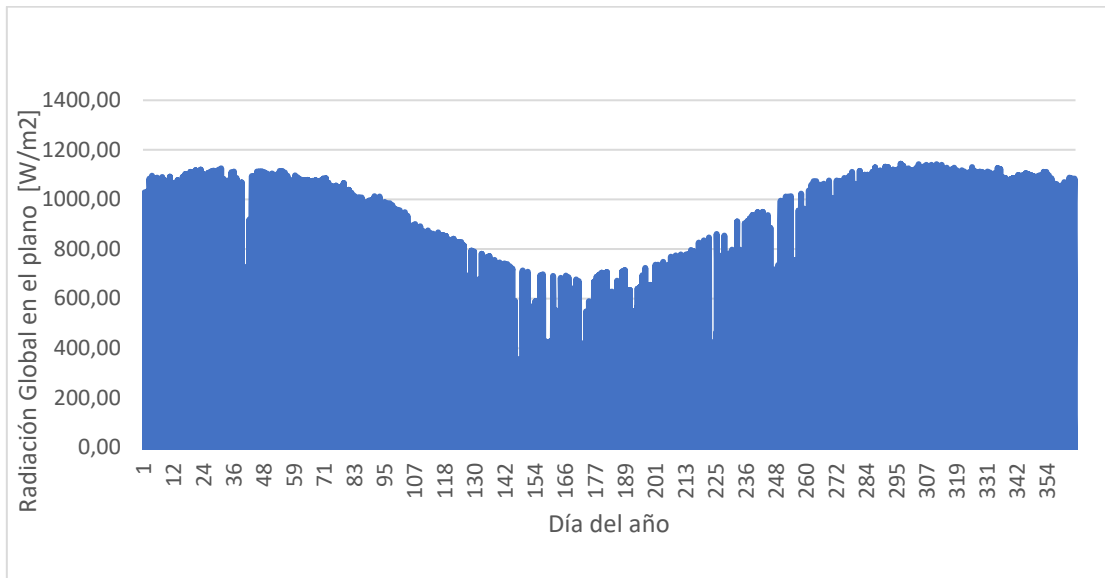


Figura 21: Perfil de radiación global incidente anual en plano de celdas fotovoltaicas Zona Norte (Elaboración Propia).

La velocidad del viento a lo largo del año se muestra en la Figura 22, mientras que la Figura 23 presenta las velocidades promedio mensuales para esta zona.

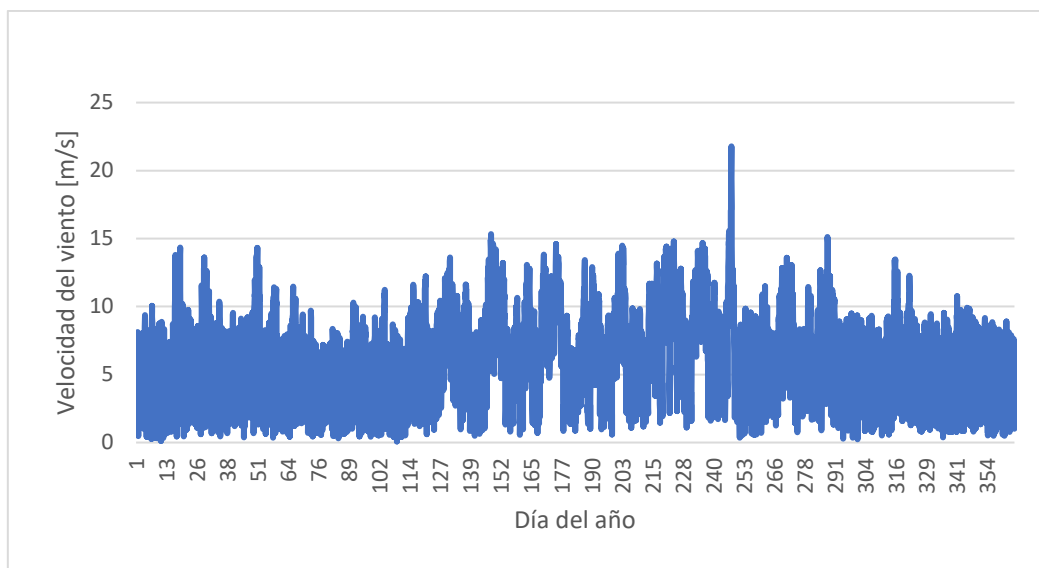


Figura 22: Perfil de velocidad del viento anual Zona Norte (Elaboración Propia).

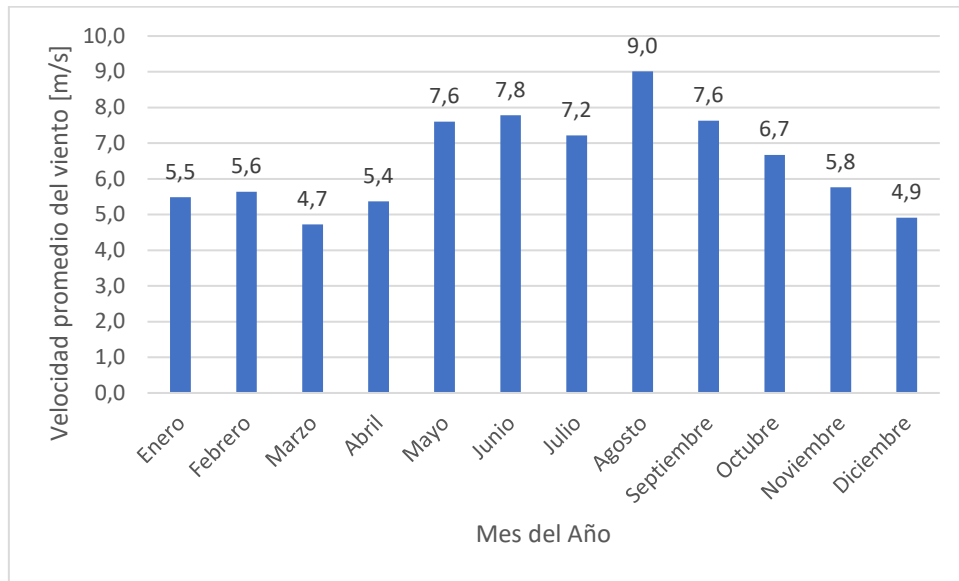


Figura 23: Velocidades promedio de cada mes Zona Norte. (Elaboración Propia).

3.2.2. Zona Centro-Sur

La Zona Centro-Sur, con un potencial viable en generación eólica y solar fotovoltaica se encuentra en la región de Bio-Bio. Se analizará una ubicación geográfica en las cercanías de Los Ángeles, cuyas coordenadas se presentan en la Tabla 6 y su ubicación en el mapa en la Figura 24, y en los párrafos siguientes se presentan los perfiles de radiación y viento para esta ubicación.

Tabla 7: Coordenadas geográficas de ubicación zona centro-sur a evaluar.

Latitud	Longitud	m.s.n.m
-37.5849	-72.5823	80

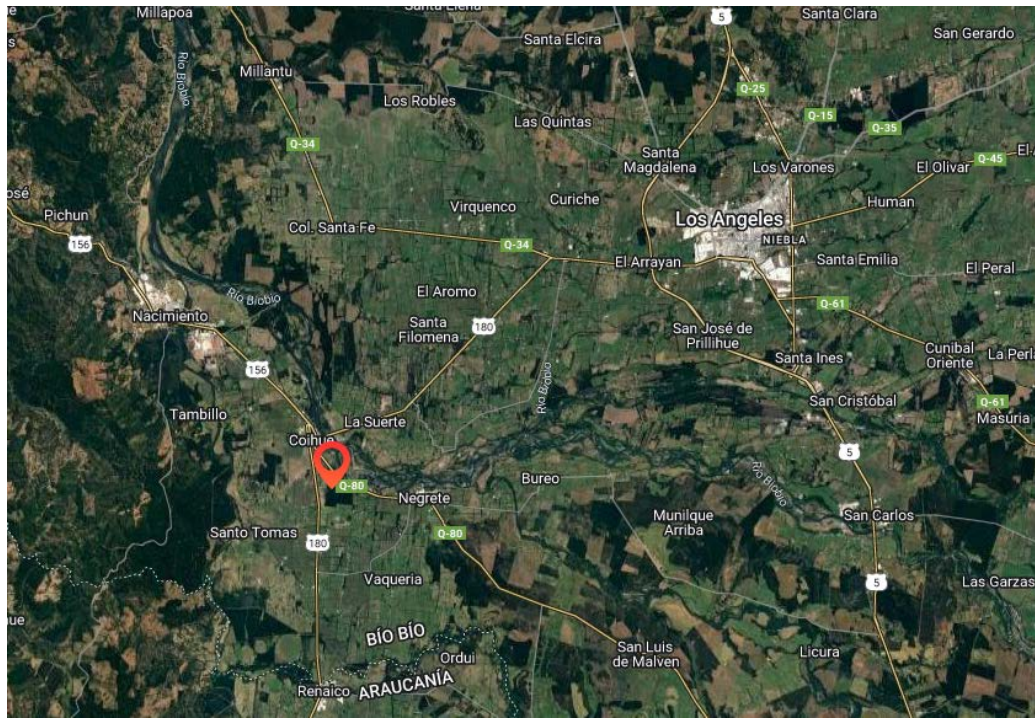


Figura 24: Mapa con ubicación de lugar seleccionado Zona Centro-Sur (Fuente: Explorador Solar[10]).

En la Figura 25, se muestra la radiación global en el plano de los paneles fotovoltaicos a lo largo del año, con orientación norte e inclinación de 37° respecto a la horizontal.

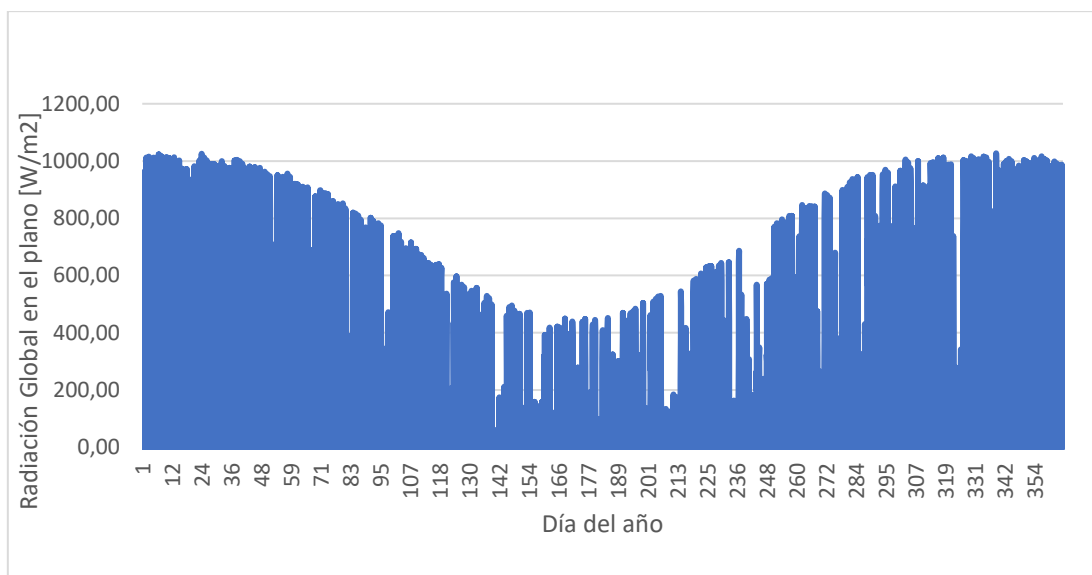


Figura 25: Perfil de radiación global incidente anual en plano de celdas fotovoltaicas Zona Centro-Sur (Elaboración Propia).



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

La velocidad del viento a lo largo del año se representa en la Figura 26, y la Figura 27 muestra las velocidades promedio mensuales para la zona.

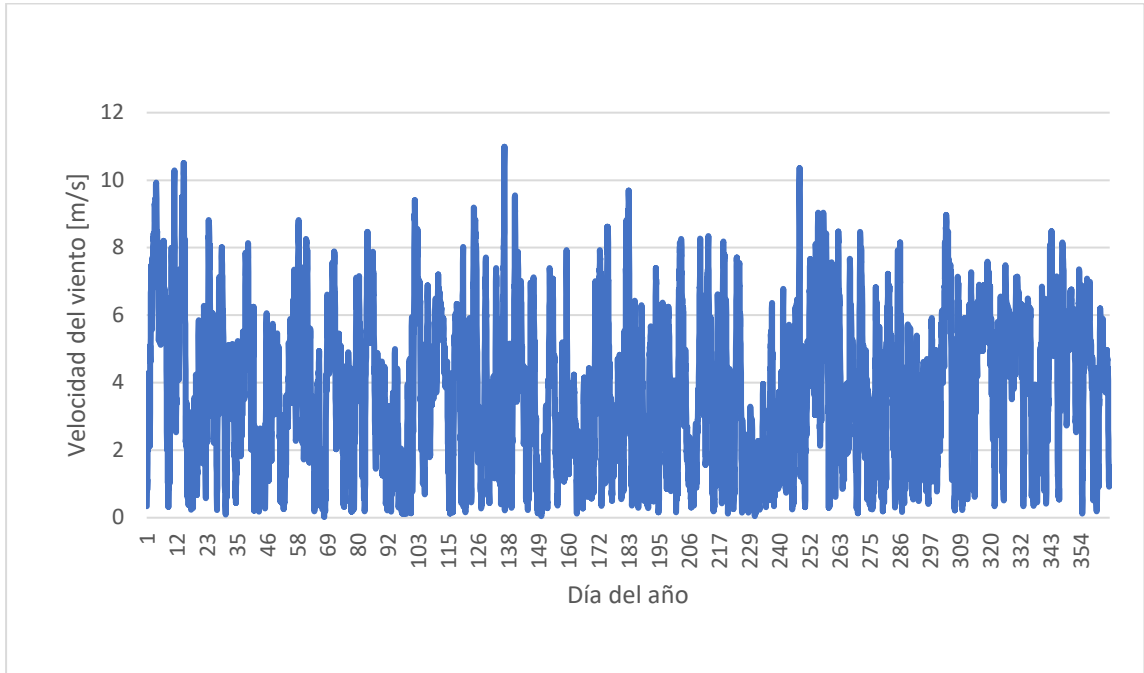


Figura 26: Perfil de velocidad del viento anual Zona Centro-Sur (Elaboración Propia).

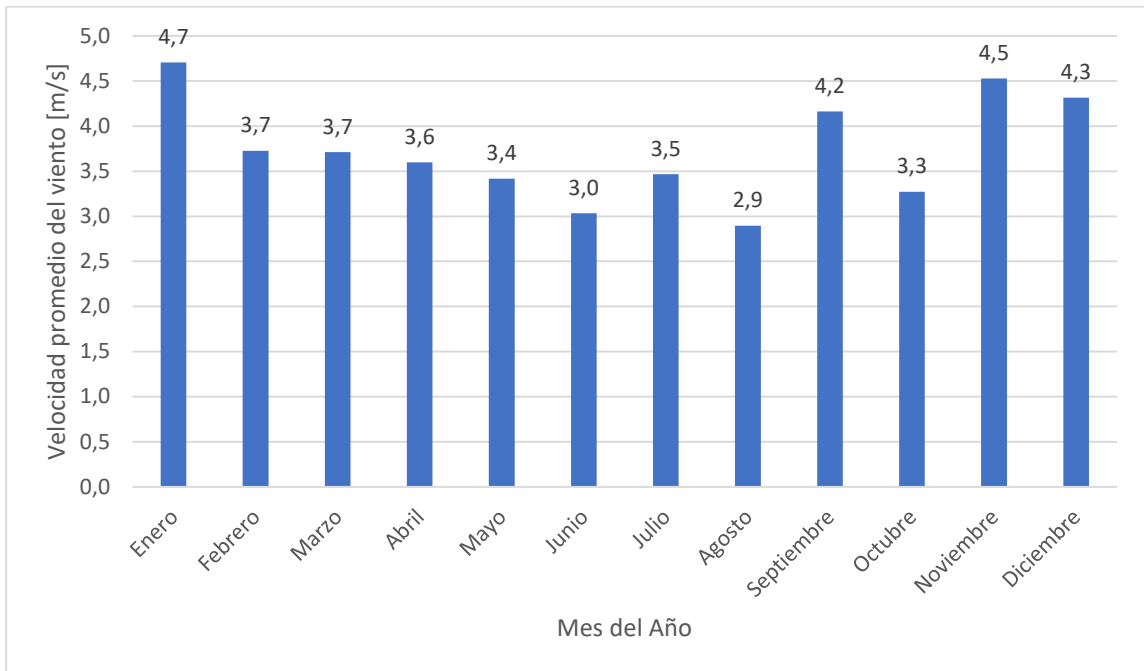


Figura 27: Velocidades promedio de cada mes Zona Centro-Sur (Elaboración Propia).

3.2.3. Zona Austral

En la Zona Austral, predomina el potencial de generación eólica. A pesar de esto, se realizará un análisis para esta zona, teniendo en cuenta que la generación principal será a partir del viento. La ubicación geográfica seleccionada se presenta en la Tabla 8 y la Figura 28.

Tabla 8: Coordenadas geográficas de ubicación zona austral a evaluar.

Latitud	Longitud	m.s.n.m
-52.4489	-70.2547	256

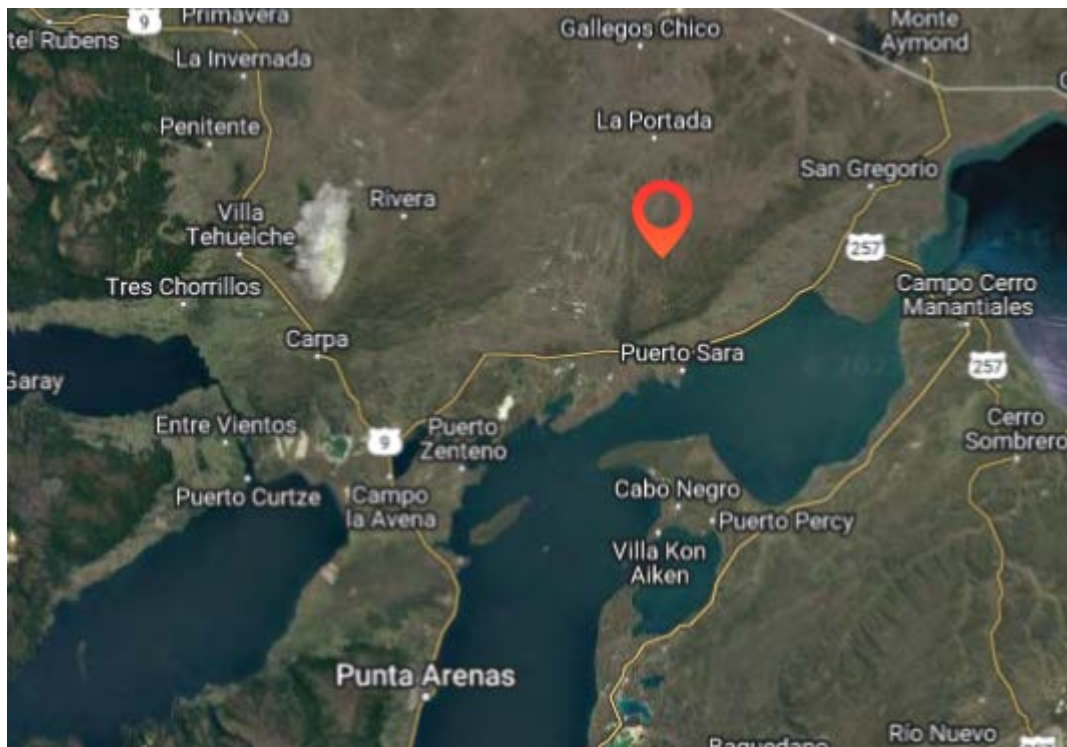


Figura 28: Mapa con ubicación de lugar seleccionado Zona Austral (Fuente: Explorador Solar[10]).

En la Figura 29, se presenta la radiación global en el plano de los paneles fotovoltaicos a lo largo del año, con orientación norte e inclinación 52° respecto a la horizontal.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

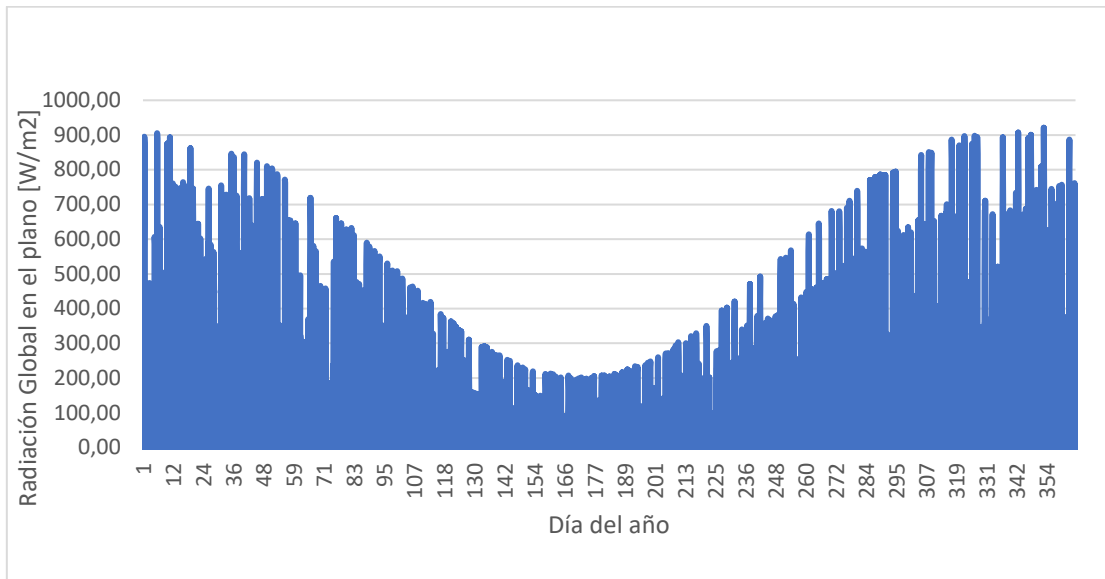


Figura 29: Perfil de radiación global incidente anual en plano de celdas fotovoltaicas Zona Austral (Elaboración Propia).

La velocidad del viento a lo largo del año se muestra en la Figura 30, y la Figura 31 presenta las velocidades promedio mensuales para esta zona.

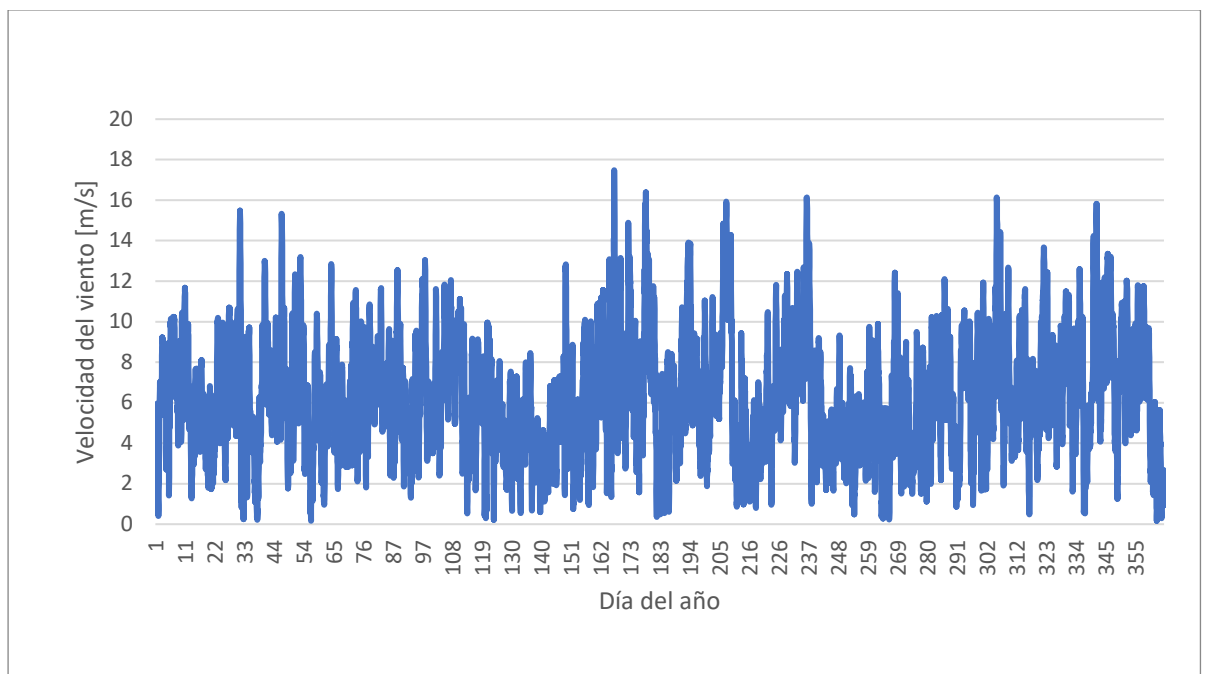


Figura 30: Perfil de velocidad del viento anual Zona Austral (Elaboración Propia).

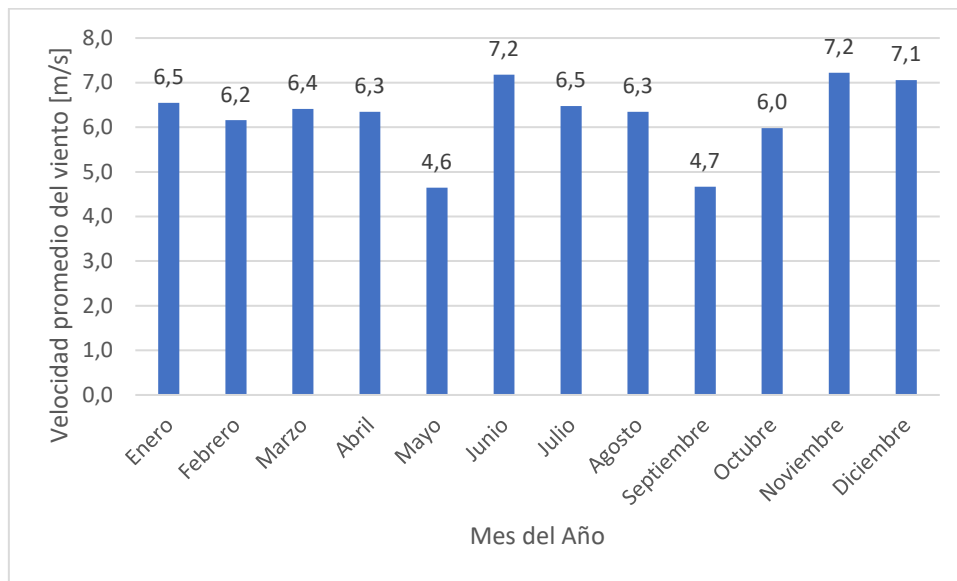


Figura 31: Velocidades promedio de cada mes Zona Austral (Elaboración Propia).

3.3. Modelado y Simulación Sistema Off-grid

Se utilizará Excel para integrar el modelamiento y simulación de la demanda, equipos y condiciones de operación, con el objeto de dimensionar y diseñar el sistema off-grid requerido.

La herramienta de cálculo creada requiere que se le ingresen datos técnicos que generalmente entrega el proveedor de los productos utilizados. De esta manera, la calculadora permite modificar desde las zonas geográficas con las entradas de los datos climatológicos, los equipos utilizados en la instalación, potencias instaladas, eficiencias consideradas, entre otros parámetros.

3.3.1. Modelo de Demanda

La estimación del consumo de energía considera la distribución de fuentes de consumo a lo largo del día. Se analiza el perfil diario de consumo para sectores residenciales, comerciales e industriales, presentando porcentajes de consumo horario en la Tabla 9 [32]. Estos perfiles fueron basados partir de la herramienta implementada por el Ministerio de Energía, Agencia Sostenibilidad energética y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, “Calculadora de Cogeneración y Trigeneración”.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Tabla 9: Perfil diario de consumo (Elaboración a partir de [32]).

Perfil diario de consumo			
Hora	Residencial	Comercial	Industrial
0	1.0%	1.1%	4.1%
1	0.9%	1.1%	4.1%
2	0.9%	1.1%	4.1%
3	0.9%	1.1%	4.1%
4	2.9%	1.1%	4.1%
5	4.5%	1.1%	4.1%
6	4.9%	1.1%	4.2%
7	4.5%	3.9%	4.2%
8	3.8%	7.6%	4.2%
9	3.9%	7.6%	4.2%
10	4.4%	7.6%	4.2%
11	4.8%	7.6%	4.2%
12	6.2%	7.6%	4.2%
13	4.7%	7.6%	4.2%
14	3.8%	7.6%	4.2%
15	3.6%	7.6%	4.2%
16	3.7%	7.6%	4.2%
17	5.9%	6.4%	4.2%
18	11.0%	5.2%	4.2%
19	9.0%	4.0%	4.2%
20	6.1%	1.1%	4.2%
21	4.2%	1.1%	4.2%
22	2.6%	1.1%	4.1%
23	1.8%	1.1%	4.1%
Total	100.0%	100.0%	100.0%

3.3.2. Modelo Panel Fotovoltaico

Se define un modelo matemático para el panel fotovoltaico mediante un circuito eléctrico equivalente de una celda solar, observable en la Figura 32.

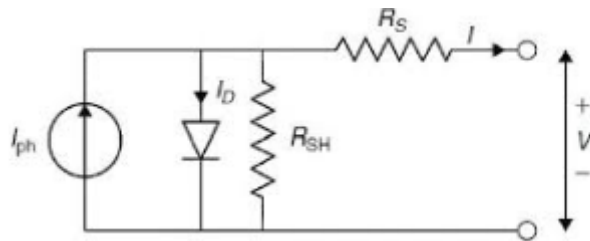


Figura 32: Circuito equivalente para una celda solar [33].

Las ecuaciones 5,6 y 7 describen la corriente de foto generación, la corriente de saturación inversa y su relación con la radiación solar y la temperatura [33].

La ecuación 5 expresa la corriente de foto generación.

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V + IR_S)}{kT_C A} \right)} - 1 \right] \quad (Ec. 5)$$

donde:

- $I_L = I_{ph}$ = Corriente fotogenerada.
- I_0 = Corriente de saturación Inversa.
- R_S = Resistencia en serie.
- q = Carga de un electrón.
- k = Constante de Boltzmann.
- T_C = Temperatura de la celda, en °K.
- A = Factor de idealidad.

La corriente de foto generación varía en función de la radiación solar y de la temperatura de trabajo de la celda. La ecuación 6 presenta su cálculo.

$$I_{ph} = I_L = \frac{S}{S_{REF}} \left[I_{L,REF} + \mu_{ISC}(T_C - T_{C,REF}) \right] \quad (Ec. 6)$$



donde:

- S =Irradiación solar.
- S_{REF} =Irradiación en condiciones de referencia (1000 W/m²).
- $I_{L,REF} = I_{SC}$ =Corriente de corto circuito.
- μ_{ISC} = Coeficiente de corto circuito.
- T_C = Temperatura de la celda, en °K.
- T_{REF} = Temperatura de la celda de referencia, en °K.

La corriente de saturación inversa se expresa mediante la ecuación 7.

$$I_O = I_{O,REF} \left(\frac{T_C}{T_{REF}} \right)^3 \exp \left(\frac{qE_G \left(\frac{1}{T_{REF}} - \frac{1}{T_C} \right)}{kA} \right) \quad (Ec. 7)$$

donde:

- $I_{O,REF}$ = Corriente de saturación Inversa en condiciones de referencia
- E_G = Energía del semiconductor en su banda de gap.

El panel fotovoltaico que se utilizará es un Tiger Neo N-Type 78HL4 de 600W marca Jinko Solar. En Anexos 1 se pueden visualizar sus datos técnicos. Se seleccionó este panel por su gran tamaño de potencia, su alta resistencia a ambientes extremos y su costo.

3.3.3. Modelo Aerogenerador

El modelo matemático de generación se basa en la curva potencia versus velocidad del viento proporcionada por el fabricante. Se realiza una aproximación lineal en todo el rango de operación del aerogenerador para obtener una representación útil para la simulación.

En el caso particular de esta memoria se tomó la curva característica del aerogenerador Proven 15 kW, esta fue extraída del explorador eólico [13] y presentada en Figura 33.

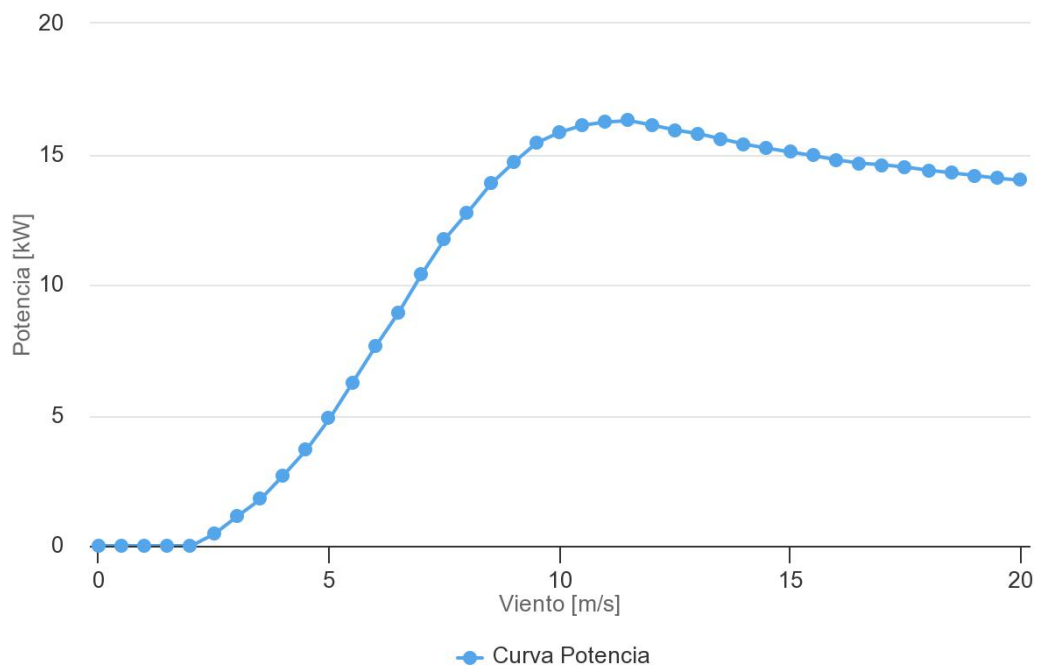


Figura 33: Curva potencia vs velocidad del viento entregada por fabricantes [13].

La aproximación lineal fue obtenida por Excel, siendo un polinomio de orden 6 presentado en la ecuación 8, con un R^2 de 0.9992.

$$y = -4 \cdot 10^{-6}x^6 + 7 \cdot 10^{-5}x^5 + 0.0056x^4 - 0.2017x^3 + 2.2975x^2 - 8.0645x + 9.4419 \text{ (Ec. 8)}$$

Se seleccionó este aerogenerador por su potencia y tamaño reducido, para dar soluciones a comunidades y empresas con consumos no tan elevados para aerogeneradores de mayor tamaño.

3.3.4. Modelo Almacenamiento de Baterías

Se determina utilizar baterías de ion-litio para el almacenamiento debido a su amplio rango de operación de potencias y un rango de descarga variado desde los minutos a las horas, como se indicó en el apartado de Almacenamiento de Energía [16-19].

Las baterías de ion-litio se modelan asumiendo que funcionan como acumuladores de energía, similares a un tanque de agua. La carga de la batería se compara con llenar un tanque de agua: La batería se carga cuando se le suministra energía eléctrica, y la cantidad de energía



almacenada aumenta hasta alcanzar su capacidad máxima. Por otro lado, la descarga de la batería se asemeja a vaciar un tanque de agua: la batería se descarga al extraer energía para satisfacer una demanda, disminuyendo la cantidad de energía almacenada según la cantidad extraída [34].

El banco de baterías modulares que se utilizarán son de la marca Xinpinzhi de 30 kWh, en Anexo 2 se puede ver las especificaciones técnicas.

3.3.5. Modelo Generación Hidrógeno

Se modela un electrolizador considerando la eficiencia de los equipos. La ecuación 9 relaciona la potencia de hidrógeno con la potencia consumida a través de su eficiencia, parámetro normalmente entregado por los fabricantes y se asume un comportamiento lineal en función de la corriente suministrada [35].

$$\eta_{El} = \frac{P_H}{P_{in}} \quad (Ec. 9)$$

El electrolizador PEM que se utilizará es de la Marca Cawolo de 10 kW cada uno. En Anexo 3 se puede observar sus especificaciones técnicas.

3.3.6. Indicadores Económicos

Se evalúa la viabilidad económica considerando el costo nivelado de energía (LCOE) y el costo nivelado de hidrógeno (LCOH), se determinan CAPEX, OPEX, generación anual, inversión, y se calculan los indicadores económicos. Para poder comparar con el mercado.

El costo nivelado de energía es definido por la ecuación 10.

$$LCoE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + OM_t + F_t}{(1+R)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+R)^t}} \quad (Ec. 10)$$

donde I_t es la inversión realizada en el año t , OM_t corresponden a los costos de operación y mantenimiento en el año t . F_t es el costo de combustible del sistema de respaldo



en el año t , R es la tasa de descuento, n es la cantidad de años de operación de la instalación, E_t es la producción de energía en el año t [36].

Los parámetros que se consideraron para obtener el LCOE son: El almacenamiento por baterías (con una autonomía de 2 días); Los sistemas de generación de energía eléctrica solar, eólica y por combustible fósil; Un precio de venta de la energía de 0.41USD/kWh [37] y un costo de combustible de 1.4 USD/L [38]; Los costos de inversión para el sistema solar fotovoltaico y eólica fueron de 655 y 812 USD/kWp respectivamente, mientras que el costo de almacenamiento es de 171 USD/kWh (Calculados en Anexo 4). Además, se consideró un costo de operación del 2% del costo total de la inversión para cada componente [39]. Se realizó el análisis con un horizonte de evaluación de 20 años, aplicando una tasa de descuento del 10% y considerando un costo de reposición de las baterías al año 10.

Para el cálculo del costo nivelado de hidrógeno, se utilizará la expresión 11.

$$LCoH = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{I_i + O_i - R_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{(1+r)^i}} \quad (Ec. 11)$$

Donde I_i es la inversión realizada en el año i , O_i corresponden a los costos de operación en el año i . R_i corresponden a los ingresos por venta en el año i , r es la tasa de descuento, E_i Es la producción de hidrógeno en kg en el año i [39].

Para la evaluación del costo nivelado de hidrógeno, se han considerado diversos aspectos, entre ellos: el costo de los electrolizadores, purificadores de agua, sistemas anexos, almacenamiento, obras civiles y costo de ingeniería. Se ha establecido un precio de venta del hidrógeno de 5 USD/kg, debido a que los precios de mercado para el hidrógeno verde están en torno a 5-8 USD/kg [40]. Además, se ha tomado en cuenta un costo de operación del 2% del costo total de inversión [39]. El análisis se ha realizado con un horizonte de evaluación de 20 años, aplicando una tasa de descuento del 10% y considerando un costo de reposición de las celdas de los electrolizadores al año 10.



Hay que considerar que, para esta presente memoria, se separan los costos del sistema de generación de energía eléctrica y el de generación de hidrógeno para evaluarlos según su indicador correspondiente.

3.3.7. Validación de modelos

Los modelos de generación solar fotovoltaico y eólico fueron validados a través del explorador solar y eólico del Ministerio de Energía, en la tabla 10, se presentan la generación obtenida para cada zona norte (ZN), zona centro-sur (ZS) y zona austral (ZA) para el caso base (CB) y los obtenidos por el explorador.

Para el caso de la validación del modelo de generación de hidrógeno se utilizó el modelo presentado en el apartado 3.5 y el modelo electroquímico de electrolisis (EQ), donde hubo diferencias del modelo presentado, donde se atribuye a las eficiencias no consideradas en el modelo electroquímico.

Tabla 10: Validación de los modelos utilizados (Elaboración propia).

	Modelado	Referencia	Variación
Generación Solar PV	ZN CB 396,159 kWh	Explorador 394,920 kWh	<5%
	ZS CB 269,285 kWh	Explorador 279,834 kWh	
	ZA CB 205,530 kWh	Explorador 215,066 kWh	
Generación Eólica	ZN CB 894,383 kWh	Explorador 921,214 kWh	<3%
	ZS CB 363,173 kWh	Explorador 370,436 kWh	
	ZA CB 842,058 kWh	Explorador 858,899 kWh	
Generación H2	ZN CB 72,905 kWh	EQ 79,997 kWh	<9%
	ZS CB 70,266 kWh	EQ 77,054 kWh	
	ZA CB 74,498 kWh	EQ 81,694 kWh	



3.4. Dimensionamiento de Sistema Off-grid

En el siguiente apartado se entregan las directrices generales de dimensionamiento de la instalación. Se debe tener en cuenta que, dada la variación de casos, zonas geográficas y potencial energético, el diseño de cada instalación evaluada será variable.

3.4.1. Dimensionamiento Arreglo Fotovoltaico

El dimensionamiento del arreglo fotovoltaico inicia con la determinación de la demanda diaria requerida, según la ecuación 12. La demanda toma en cuenta tanto el consumo en corriente continua (C_{DC}) como el consumo de corriente alterna (C_{AC}), considerando eficiencias del inversor (η_{INV}) y factores de pérdida (p) [41].

$$E_d = (C_{DC} + \frac{C_{AC}}{\eta_{INV}})(1 + p) \quad (Ec. 12)$$

Luego se determina la cantidad de paneles ($N_{paneles}$) mediante la ecuación 13, dividiendo la demanda diaria por la energía que genera un panel (E_{1panel}).

$$N_{paneles} = \frac{E_d}{E_{1panel}} \quad (Ec. 13)$$

3.4.2. Dimensionamiento del Almacenamiento por Baterías

El tamaño del sistema de almacenamiento se define considerando la autonomía requerida y la profundidad de descarga. La ecuación 14 establece el número de baterías (N_{bat}), tomando en cuenta el consumo diario de energía (E_d), la tensión de la batería (V_{bat}), la corriente de la batería (A_{bat}), la profundidad de descarga (P_d), y el número de días de autonomía (n). [41]

$$N_{bat} = \frac{E_d * n}{V_{bat} * A_{bat} * P_d} \quad (Ec. 14)$$



3.4.3. Dimensionamiento Arreglo Eólico

Para el dimensionado del arreglo eólico, se busca seleccionar los aerogeneradores que sean técnica y económicamente viables, que garanticen la mayor confiabilidad al sistema de generación. Para esto, se debe considerar el perfil de velocidad del sitio y contrastarlo con la curva de potencia versus velocidad del viento entregada por el fabricante, con el objetivo de poder elegir el aerogenerador que mejor se adapta a los requerimientos energéticos necesarios.

3.4.4. Dimensionamiento Generación de Hidrógeno y Almacenamiento

El proceso de dimensionamiento del sistema de generación de hidrógeno comienza con la determinación de la capacidad de generación eléctrica anual a partir de fuentes de energía eólica y solar fotovoltaica, así como la demanda eléctrica anual. Con estos datos, se calcula el excedente de energía eléctrica que no es utilizado por el sistema.

A continuación, se define el porcentaje de utilización de este excedente energético y se considera el consumo anual de energía de un electrolizador. Con esta información, se puede determinar la cantidad de electrolizadores necesarios para cumplir con el porcentaje de utilización del excedente de energía eléctrica, después de haber satisfecho la demanda. En la Figura 34 se muestra el diagrama del proceso descrito.

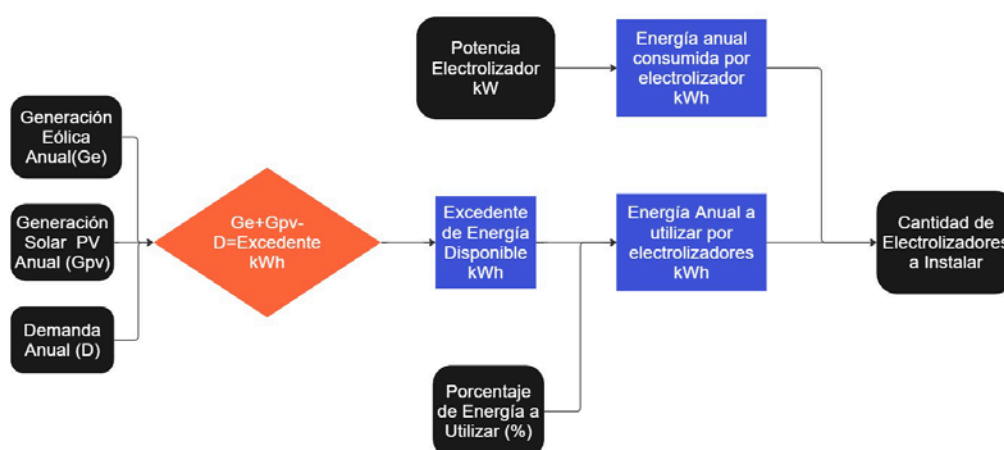


Figura 34: Metodología seguida para dimensionamiento de Generación de Hidrógeno (Elaboración Propia)



El estanque se dimensionó para que fuera capaz de almacenar 120kg (4.891 kWh) de hidrogeno a 30 bar, siendo este de un tamaño de 50m³.

3.4.5. Dimensionamiento de Respaldo

El sistema de respaldo por combustible fósil se dimensionó para suministrar la potencia faltante en las peores condiciones de generación y almacenamiento del año. En todos los casos estudiados, esta condición fue aproximadamente de 100 kW.

Por lo tanto, se determinó que el generador de respaldo debe ser de 150 kVA para asegurar un suministro adecuado y sin problemas. La ecuación 15 muestra cómo dimensionar la potencia del grupo electrógeno, considerando un factor de seguridad del 50%.

$$P_{grupo} = (1 + FS) \max(Demanda - Generación) \text{ (Ec. 15)}$$

3.5. Calculadora online

El modelamiento, dimensionamiento y simulación descritos en el apartado de metodología fueron realizados en Excel y se utilizaron para obtener los resultados para los casos y zonas geográficas mencionados anteriormente.

Los documentos generados se dividen en 5 planillas interconectadas que corresponden a distintos módulos del sistema. En este apartado se describirán el orden de ingreso de parámetros para obtener los cálculos de los sistemas que se requieran analizar. Esto tiene como objetivo generar una herramienta que permita realizar el análisis de prefactibilidad técnico-económico para sistemas híbridos off-grid con generación de energía eléctrica a partir de energía solar fotovoltaica y eólica, almacenamiento de energía mediante baterías y generación de hidrógeno con el exceso de energía producida.



3.5.1. Módulo de Generación Solar Fotovoltaica

Esta planilla de Excel tiene cuatro hojas. Dentro de ellas, se deberán completar las celdas resaltadas en amarillo, que detallan los parámetros de entrada necesarios para realizar los cálculos según la configuración del sistema, como las especificaciones técnicas de los paneles y las eficiencias de los elementos. A continuación, se detalla la secuencia y los parámetros de llenado de cada hoja.

- A. Hoja “TMY-PV”:** En esta hoja se realizan todos los cálculos internos de la generación solar fotovoltaica. Aquí se deben ingresar los datos TMY de Radiación Global Incidente (GHI) y Temperatura en las columnas C y D para las 8760 horas del año. En la Tabla 11, se observan las columnas resaltadas que se deben ingresar de los datos TMY del lugar.

Tabla 11: Datos TMY de entrada para hoja “TMY-PV” Módulo Solar PV (Elaboración Propia).

Datos TMY de lugar			
Fecha	Hora	ghi	temp
01-01	0	0	18,95
01-01	1	0	18,85
01-01	2	0	18,42
01-01	3	0	18,2
01-01	4	0	18,13
01-01	5	0	17,31
01-01	6	1,58	17,43
01-01	7	227,26	18,09
01-01	8	482,56	19,39
01-01	9	723,3	20,72

- B. Hoja “Panel Fotovoltaico”:** En esta hoja se ingresan las especificaciones técnicas del panel que se utilizará para la generación que son: Marca; Modelo; Potencia Nominal; Tensión máxima; Corriente máxima; Tensión en circuito abierto; Corriente de corto circuito; Eficiencia del módulo; Coeficiente de temperatura de potencia máxima; Coeficiente de temperatura para tensión en circuito abierto; Coeficiente de temperatura para corriente de cortocircuito; Cantidad de celdas en



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

paralelo; Cantidad de celdas en serie; Largo y Ancho. En la Tabla 12, se observan los datos de entrada que se deben ingresar.

*Tabla 12: Especificaciones técnicas de entrada para hoja “Panel Fotovoltaico” Módulo Solar PV
(Elaboración Propia).*

Panel Fotovoltaico	
Marca	Jinko
Modelo	JKM600N-78HL4
Especificaciones	STC
Potencia nominal	600 Wp
Tensión de máxima potencia Vmpp	45,39 V
Corriente de máxima potencia Imp	13,22 A
Tensión en circuito abierto Voc	54,95 V
Corriente de cortocircuito Isc	13,97 A
Eficiencia módulo	21,46 %
Coefficiente de temperatura de Pmax	-0,3 %/°C
Coefficiente de temperatura de Voc	-0,25 %/°C
Coefficiente de temperatura de Isc	0,046 %/°C
Cantidad en paralelo	2
Cantidad de celdas en serie	78
Dimensiones	
Largo	2,465 m
Ancho	1,134 m

C. Hoja “Resultados”: En esta hoja se ingresan los parámetros de configuración del sistema junto con los datos geográficos del lugar donde se están realizando los cálculos. Los parámetros de entrada son: Latitud; Longitud; Metros sobre el nivel del mar; Inclinación de paneles; Cantidad de paneles en paralelo; Cantidad de paneles en serie; Eficiencia del inversor; Perdidas del sistema. Además, en esta hoja se pueden visualizar gráficos de energía generada por el sistema a lo largo del año, radiación global incidente en el plano del panel, generación mensual y eficiencia del sistema a lo largo del año con respecto a la energía disponible por radiación, tanto en porcentaje como en energía. En la Tabla 13, se presentan los datos que se deben modificar.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

*Tabla 13: Parámetros de configuración y geográficos para hoja “Resultados” Módulo Solar PV
(Elaboración Propia).*

Datos							
Geograficos			Inclinacion paneles				
Latitud	Longitud	m.s.n.m	25		Grados		
-25,10	-69,57	2775			Eficiencia inversor 97%		
					Perdidas 5%		
Cantidad de paneles							
Paralelo	Serie	Corriente	Tensión	Potencia	Area 1 Panel	Area total	Area 1 panel
-	-	A	V	kW	m2	m2	cm2
25	12	330,5	544,68	180,01674	2,79531	838,593	27953,1

D. Hoja “Análisis de Resultados”: Esta hoja está equipada con una tabla dinámica que permite al usuario obtener gráficos y datos rápidos de este módulo.

3.5.2. Módulo de Generación Eólico

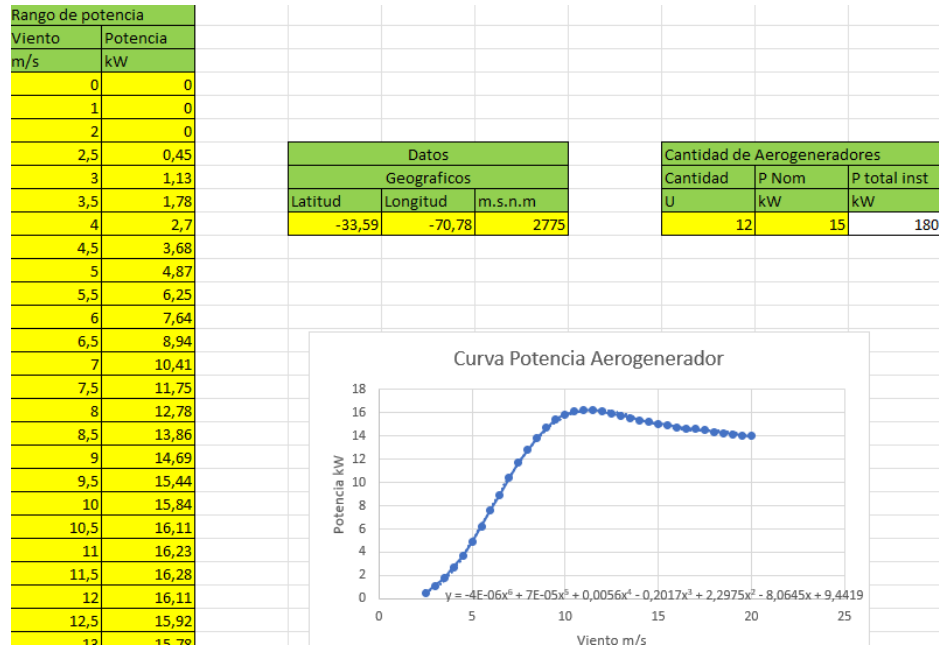
Esta planilla de Excel consta de 3 hojas en las cuales se deben completar las celdas resaltadas en amarillo. Estas celdas detallan los parámetros de entrada necesarios para realizar los cálculos según la configuración del sistema, como la curva de característica de potencia del aerogenerador, datos geográficos, potencia nominal, cantidad de aerogeneradores y datos TMY de ubicación. A continuación, se detalla la secuencia y los parámetros de llenada de cada hoja.

A. Hoja “Configuración”: En esta hoja se ingresan los datos de la curva de potencia del aerogenerador en relación a la velocidad del aire y la potencia generada con el fin de encontrar la aproximación lineal de sexto orden. También se incluyen los datos geográficos, la cantidad de aerogeneradores y su potencia nominal. La Tabla 14 muestra los datos que deben introducirse.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Tabla 14: Parámetros de configuración y geográficos para hoja “Configuración” Módulo Eólico
(Elaboración Propia).



B. Hoja “TMY-Eolico”: En esta hoja se realizan todos los cálculos internos de la generación eólica, se deben ingresar los datos TMY de velocidad del viento y temperatura en las columnas C y D para las 8760 horas del año. En la Tabla 15, se muestran las columnas resaltadas que deben ser completadas con los datos TMY del lugar.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Tabla 15: Datos TMY de entrada para hoja “TMY-Eólico” Módulo Eólico (Elaboración Propia).

Datos TMY de lugar			
Fecha	Hora	Vviento	temp
01-01	0	0,81	18,95
01-01	1	0,73	18,85
01-01	2	1,72	18,42
01-01	3	2,19	18,2
01-01	4	2,87	18,13
01-01	5	3,21	17,31
01-01	6	2,71	17,43
01-01	7	1,49	18,09
01-01	8	1,72	19,39
01-01	9	3,62	20,72
01-01	10	4,81	20,67
01-01	11	5,1	21,28
01-01	12	5,9	21,68
01-01	13	6,48	21,93

C. **Hoja “Análisis de Resultados”**: Esta hoja está equipada con una tabla dinámica que permite a los usuarios obtener los gráficos y datos de forma rápida desde este módulo.

3.5.3. Módulo de Demanda

Esta planilla de Excel consta de tres hojas, donde una de ellas requiere que se completen las celdas resaltadas en amarillo con los parámetros de entrada necesarios para calcular la demanda. A continuación, se detalla la secuencia y los parámetros de llenado de cada hoja.

A. Hoja “Demanda: En esta hoja se ingresan los parámetros de consumo en kWh por mes y el porcentaje de utilización de energía por hora del total diario para obtener perfiles distintos para los sectores residencial, comercial e industrial. También se muestran gráficos de consumos mensuales y diarios por mes. En la Tabla 16 se detallan los parámetros a modificar.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Tabla 16: Parámetros entrada para hoja “Demanda” Módulo Demanda (Elaboración Propia).

Perfil de consumo de energía eléctrica			Perfil diario de consumo				
Mes	Consumo de energía eléctrica		Perfil diario de consumo				Otro
	kWh/mes	kWh/día	Hora (h)	Residencial	Comercial	Industrial	
Enero	71.550	2308	0	1,0%	1,1%	4,1%	1,0%
Febrero	71.550	2555	1	0,9%	1,1%	4,1%	1,0%
Marzo	71.550	2308	2	0,9%	1,1%	4,1%	2,0%
Abril	71.550	2385	3	0,9%	1,1%	4,1%	3,0%
Mayo	71.550	2308	4	2,9%	1,1%	4,1%	4,0%
Junio	71.550	2385	5	4,5%	1,1%	4,1%	10,0%
Julio	71.550	2308	6	4,9%	1,1%	4,2%	5,0%
Agosto	71.550	2308	7	4,5%	3,9%	4,2%	4,2%
Septiembre	71.550	2385	8	3,8%	7,6%	4,2%	4,2%
Octubre	71.550	2308	9	3,9%	7,6%	4,2%	4,2%
Noviembre	71.550	2385	10	4,4%	7,6%	4,2%	4,2%
Diciembre	71.550	2308	11	4,8%	7,6%	4,2%	7,0%
Total Anual	858.600		12	6,2%	7,6%	4,2%	4,2%
Promedio	71550,000		13	4,7%	7,6%	4,2%	4,2%
Max	71550,000	2555,357	14	3,8%	7,6%	4,2%	4,2%
Min	71550,000	2308,065	15	3,6%	7,6%	4,2%	4,2%
			16	3,7%	7,6%	4,2%	4,2%
			17	5,9%	6,4%	4,2%	4,2%
			18	11,0%	5,2%	4,2%	4,2%
			19	9,0%	4,0%	4,2%	4,2%
			20	6,1%	1,1%	4,2%	4,2%
			21	4,2%	1,1%	4,2%	4,2%
			22	2,6%	1,1%	4,1%	4,1%
			23	1,8%	1,1%	4,1%	4,1%
			Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

- B. Hoja “DemandaCal”:** Se realizan los cálculos internos para obtener los consumos diarios para el año completo.
- C. Hoja “Resultados”:** Esta hoja cuenta con una tabla dinámica para que quien la utilice pueda obtener gráficos y datos rápidos de este módulo.

3.5.4. Módulo de Despacho

En esta planilla se ingresan los parámetros de los electrolizadores y baterías, y se integran los módulos anteriores para analizar cómo se comporta el sistema con la generación de energía, demanda, almacenamiento de baterías y producción de hidrógeno para distintos perfiles. A continuación, se describe la secuencia de ingreso de parámetros y el contenido de cada hoja.

- A. Hoja “H2”:** En esta hoja se ingresan las especificaciones técnicas del electrolizador evaluado, la densidad del hidrógeno a la presión y temperatura de generación, la cantidad de electrolizadores y la capacidad de almacenamiento del tanque. En la Tabla 17 se detallan los datos requeridos.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Tabla 17: Especificaciones técnicas de entrada para hoja “H2” Módulo Despacho (Elaboración Propia).

Electrolizador PEM		
Marca	CAWOLO	
Flujo de salida H2	2	Nm3/h
Flujo de salida O2	1	Nm3/h
Presión de salida	30	bar
Potencia electrolizador	10	kW
Tensión nominal	100	VDC
Corriente nominal	100	ADC
Corriente de funcionamiento	0-100	ADC
Presión de entrada máximo	2	bar
Consumo de agua	1,7	L/h
Temperatura de trabajo	45-65	°C
Eficiencia energética	74%	%
Densidad O2 a 25° y 1 atm	1,308	kg/m3
Densidad H2 a 15°C y 1 atm	0,08524	kg/m3
Flujo másico de H2	0,17048	kg/h
Flujo másico de O2	0,08524	kg/h
Densidad H2 a 25°C y 30 bar	2,471	kg/m3
Configuración Electrolizadores		
Cantidad de electrolizadores	3	U
Potencia Inst Electrolizador	30	kW

B. Hoja “Baterías y Grupo Electro”: En esta hoja se ingresan los datos técnicos de las baterías, los días de autonomía, la potencia y el consumo de combustible del grupo electrógeno. En la Tabla 18 se especifican los datos necesarios para ingresar.

Tabla 18: Especificaciones técnicas de entrada para hoja “Baterías y Grupo Electro” (Elaboración Propia).

Modulo Batería		Grupo Electrogeno	
Tensión	48 V	Potencia	150 KVA
Energía	30 kWh	Potencia	120 kW
Profundidad descarga	20%	Consumo comb	34 L/h
Días de Autonomia	2		

C. Hojas Despachos y Gráficos: Estas hojas integran todos los módulos anteriores y permiten visualizar el comportamiento del sistema según el perfil de demanda por hora a lo largo del año. También muestran el nivel de carga de las baterías, la cantidad de hidrógeno generado y el uso del generador de respaldo.

3.5.5. Módulo de Económico

En esta planilla, que consta de 5 hojas, se ingresan los parámetros económicos del proyecto para realizar las evaluaciones de flujo de caja, costos nivelados de la energía y de



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

hidrógeno. Estos datos están conectados con las planillas anteriores donde se especifican la generación, demanda y cantidades de equipos utilizados. A continuación, se detallan las hojas y su contenido.

- A. Hoja “CAPEX”:** En esta hoja se ingresan las potencias y costos de los equipos para calcular los costos de inversión por módulo. Se generan los gráficos que representan la distribución de costos según la partida para cada módulo específico.
- B. Hoja “OPEX”:** Aquí se ingresa el porcentaje del costo del CAPEX para cada módulo, que se considerará como costos de operación.
- C. Hoja “Depreciación”:** Se ingresan todos los elementos que sufren depreciación, especificando su vida útil, código del SII, método de depreciación y años de depreciación. Esto determina el monto depreciado pro año para el flujo de caja.
- D. Hoja “Crédito”:** Esta hoja permite evaluar el proyecto con financiamiento a largo plazo. Se ingresan parámetros como el porcentaje de financiamiento de la inversión total, tasa anual efectiva y las cuotas.
- E. Hoja “Flujo de Caja”:** Esta hoja condensa toda la información de la anteriores en un flujo de caja proyectado a 20 años. Aquí se observan indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Costo nivelado de la Energía (LCOE) y Costo nivelado de Hidrógeno (LCOH). En la tabla 19 se detallan los parámetros de entrada, que incluyen la tasa de descuento, tasa impositiva, precio de venta del hidrógeno, precio de venta de la electricidad, costo del combustible, y porcentajes e aumento anual del costo de hidrógeno y de la electricidad.

Tabla 19: Datos de entrada para hoja “Flujo de Caja” (Elaboración Propia).

Tasa de descuento	Tasa impositiva	Precio Venta H	Precio Eº Elect	Aumento P H2	Aumento P Eº E	Eº T Generada	Eº Total Consumida	H2	Dps 2 año	Comb Utilizad	P Comp Comb	Aumento Comb	
%	%	USD/kWh	USD/kWh	%	%	kWh	kWh	% Aprovechad	% Gen H2	kWh Venta	L	USD/L	%
10%	27%	0,15	0,42	5%	1%	1288503	858600	67%	33%	68020,58	1260	\$ 1,4	0%



4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en este estudio fueron generados mediante la herramienta de cálculo para la integración de energías renovables en la generación de energía eléctrica e hidrogeno verde desarrollada en esta memoria.

El estudio de generación eléctrica y producción de hidrógeno verde en diferentes regiones de Chile, basado en el caso base y optimizado, demuestra cómo la optimización puede mejorar significativamente la eficiencia y reducir costos. A continuación, se presentan los resultados y discusión por región.

4.1. Resultados Generación Eléctrica e Hidrógeno Zona Norte

Las potencias instaladas del Caso Base fueron definidas previamente en la metodología, y a partir de ellas se determinó la demanda de energía que puede satisfacer este sistema. Estos valores se detallan en la Tabla 20.

Tabla 20: Demandas mensuales, anual y almacenamiento Zona Norte (Elaboración Propia).

Zona Norte	kWh
Demanda mensual	71,550
Demanda anual	858,600
Almacenamiento por baterías	6,390

Para el caso optimizado, se ajustaron las potencias instaladas para satisfacer la demanda energética definida en la Tabla 20. En la Tabla 21 se presentan las potencias instaladas para el caso optimizado, ajustadas para satisfacer la demanda horaria durante todo el año.

Tabla 21: Resultados de Optimización de potencia instaladas y su corrección por ajuste horario Zona Norte (Elaboración Propia).



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

	Potencia Instalada Solar Optimizada [kW]	Potencia Instalada Solar Corregida [kW]	Potencia Instalada Eólica Optimizada [kW]	Potencia Instalada Eólica Corregida [kW]
Zona Norte	73	117	165	180

4.1.1. Resultados Generación Eléctrica

En la Tabla 22 y Figura 35 se muestran las generaciones mensuales y anuales para cada tecnología en la Zona Norte.

*Tabla 22: Generación mensual y anual de los Sistemas de Generación Zona Norte
(Elaboración Propia).*

Mes	Caso Base		Caso Optimizado	
	Solar PV [kWh]	Eólica [kWh]	Solar PV [kWh]	Eólica [kWh]
Enero	36,408	59,387	23,665	59,388
Febrero	32,458	56,873	21,098	56,873
Marzo	36,965	44,882	24,027	44,882
Abril	31,521	57,419	20,489	57,420
Mayo	28,364	93,674	18,437	93,675
Junio	26,013	93,644	16,908	93,645
Julio	26,534	89,682	17,247	89,683
Agosto	29,860	112,847	19,409	112,847
Septiembre	33,755	91,051	21,941	91,051
Octubre	38,262	80,896	24,870	80,897
Noviembre	36,774	62,701	23,903	62,702
Diciembre	37,204	51,321	24,183	51,322
Total Anual	394,119	894,383	256,178	894,383



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

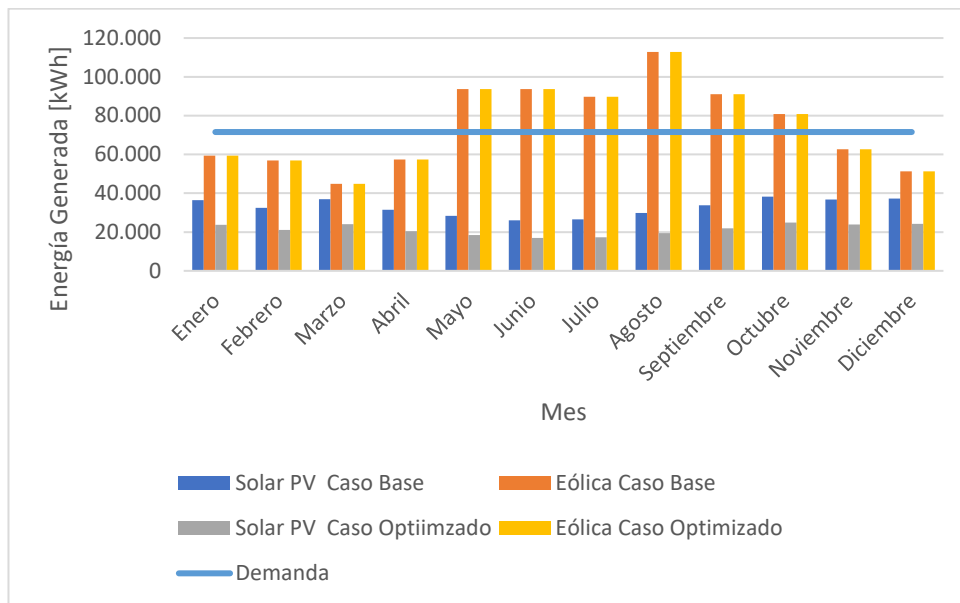


Figura 35: Demandas mensuales, Generación mensual Eólica y Solar Fotovoltaica Zona Norte (Elaboración Propia).

En el Caso Optimizado, la potencia instalada de energía solar fotovoltaica se reduce en un 35% en comparación con el Caso Base, lo que equivale a una disminución en la generación de energía eléctrica de 137,941 kWh. En contraste, la potencia instalada de energía eólica se mantiene.

Tabla 23: Generación Anual, Demanda anual y excedente de generación Zona Norte (Elaboración Propia).

	Generación Anual [kWh]	Demanda anual [kWh]	Excedente de Generación [kWh]
Caso Base	1,288,502	858,600	429,902
Caso Optimizado	1,150,561	858,600	291,961

La Tabla 23 muestra la generación anual, la demanda anual y el excedente de generación disponible para la producción de hidrógeno verde. El excedente se reduce en un 32%, lo que indica una mejor alineación entre la generación y la demanda, mejorando así la eficiencia del sistema.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

En las Figuras 36,37,38 y 39 se presenta el análisis horario de las fuentes de generación, la demanda residencial y el porcentaje de carga de las baterías. Se han seleccionado días típicos para representar el comportamiento de ambos casos en verano e invierno: el 15 de diciembre y el 14 de junio.

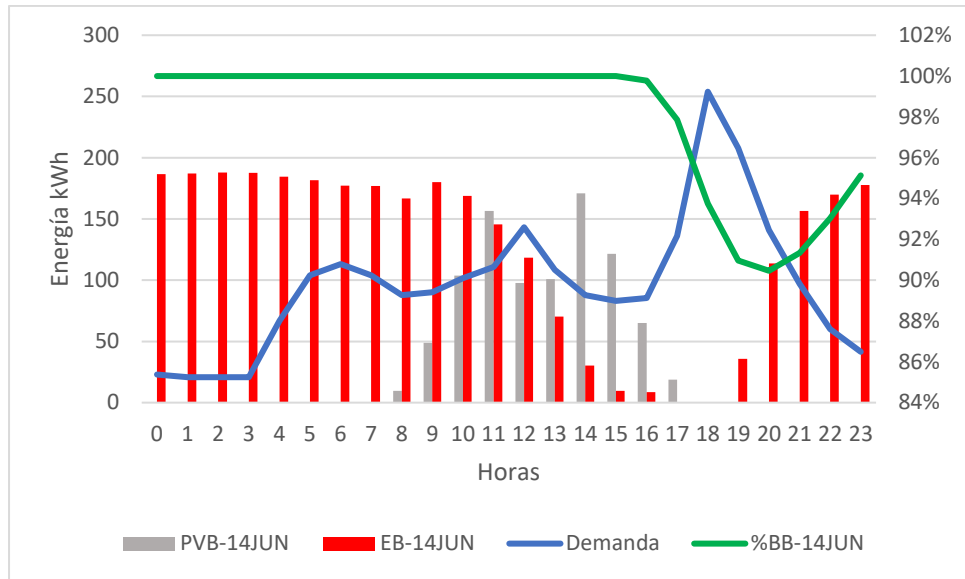


Figura 36: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 14 de junio para Caso Base Zona Norte (Elaboración Propia).

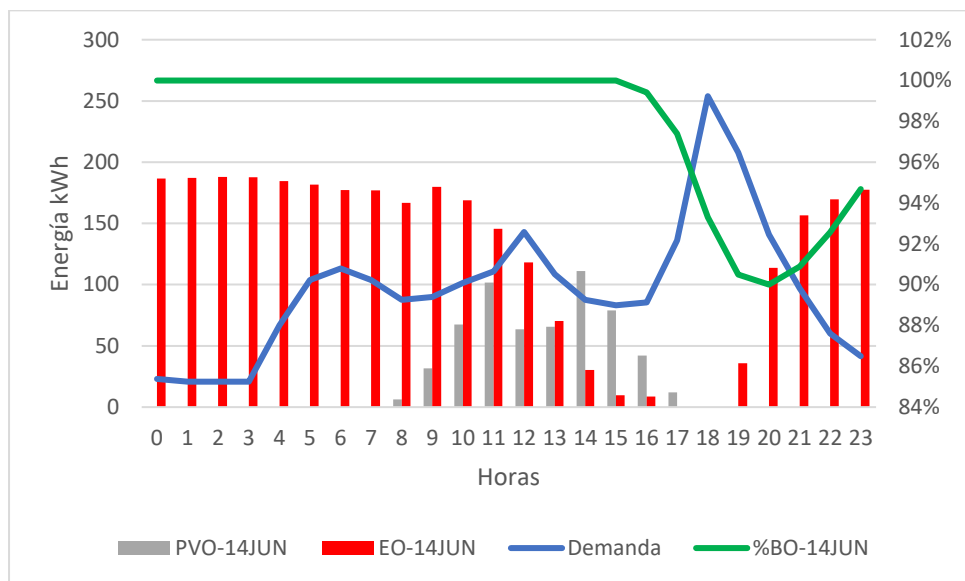


Figura 37: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 14 de junio para Caso Optimizado Zona Norte (Elaboración Propia).



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
 SANTIAGO – CHILE

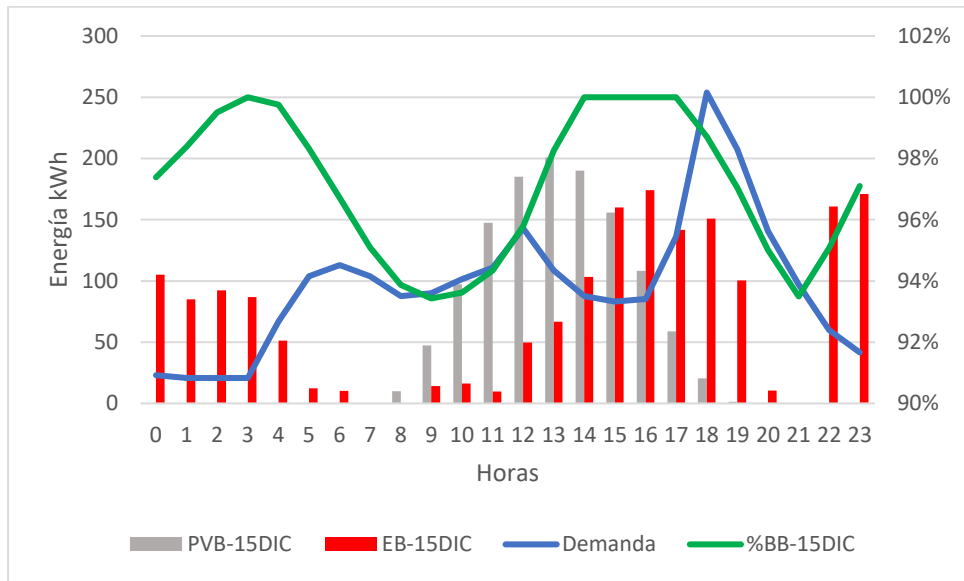


Figura 38: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 15 de diciembre para Caso Base Zona Norte (Elaboración Propia).

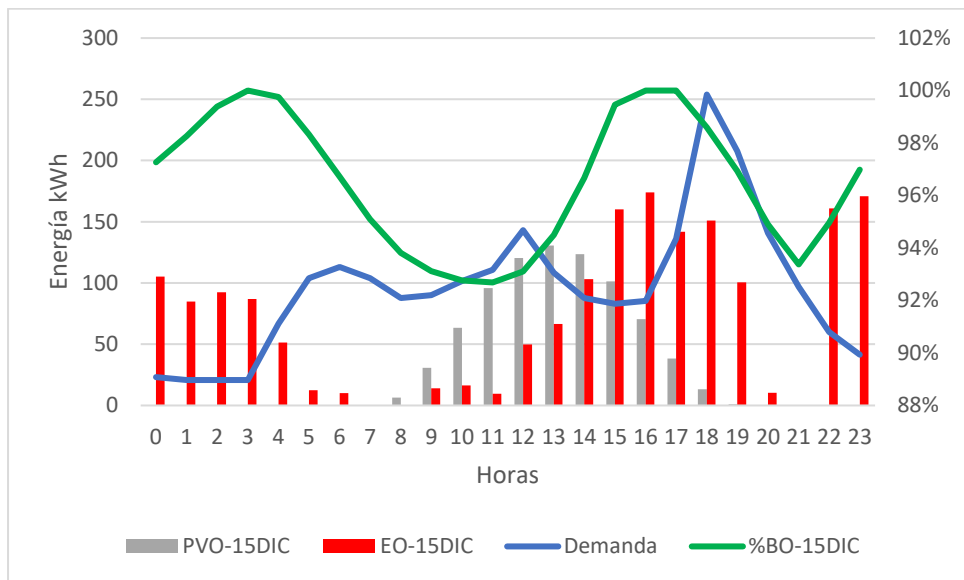


Figura 39: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 15 de diciembre para Caso Optimizado Zona Norte (Elaboración Propia).

En la zona norte, durante el invierno, la producción de energía ocurre durante gran parte del día, excepto entre las 17:00 y las 22:00 horas. Este periodo coincide con una alta demanda de energía residencial, lo que requiere que las baterías cubran esta necesidad. La



energía utilizada en esta franja representa solo al 10% de la capacidad de almacenamiento de las baterías, permitiendo que se recarguen durante el resto del día.

Por otro lado, el 15 de diciembre seleccionado como día típico de verano muestra una disminución en la generación de energía en dos intervalos: de 5:00 a 8:00 horas y de 19:00 a 21:00 horas, coincidiendo con los picos de demanda. Durante estos períodos, se utiliza la energía almacenada en las baterías para cubrir la demanda, fluctuando entre 100% a 92% de la capacidad de energía de las baterías. Sin embargo, gracias a la alta producción de energía en las horas de la tarde por ambos sistemas de generación, las baterías pueden ser recargadas.

En ambos días, las baterías no alcanzaron su nivel mínimo de descarga, por lo que no fue necesario recurrir al sistema de respaldo basado en combustible fósil.

4.1.2. Resultados Generación Hidrógeno

Con los excedentes de energía disponibles, se procede al cálculo de generación de hidrógeno verde utilizando el modelo configurado con los parámetros establecidos para cada caso. La Tabla 24 muestra la energía disponible para los electrolizadores, la energía utilizada por estos, el porcentaje de utilización de la energía disponible, la cantidad de hidrógeno producido, las horas de operación de los electrolizadores, los factores de planta y la cantidad de electrolizadores empleados para ambos casos analizados.



Tabla 24: Producción de Hidrógeno Verde Zona Norte (Elaboración Propia).

	Caso Base	Caso Optimizado
Energía Disponible [kWh]	453,260	291,961
Energía Utilizada por Electrolizadores[kWh]	98,521	148,214
Porcentaje Energía Utilizada	23%	51%
Hidrogeno Producido [kg]	1,841	2,771
Horas Operación Elect [h]	3,241	2,470
Factor de Planta	37%	28%
Cant. Electrolizadores	3	6

La producción de hidrógeno aumenta en un 51% entre el caso base y el optimizado. Además, el consumo de energía en el caso optimizado representa el 51% del excedente generado por el sistema, lo cual refleja una mayor eficiencia en su utilización.

4.2. Resultados Generación Eléctrica e Hidrógeno Zona Centro-Sur.

Las potencias instaladas del caso base fueron definidas previamente en la metodología, determinando la demanda de energía que puede satisfacer el sistema. En la Tabla 25 se detallan mensual y anual, así como la capacidad de almacenamiento requerida por el sistema.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Tabla 25: Demandas mensual, anual y almacenamiento Zona Centro-Sur (Elaboración Propia).

Zona Centro-Sur	kWh
Demanda mensual	21,900
Demanda anual	262,800
Almacenamiento por baterías	1,980

Para el caso optimizado, se ajustaron las potencias instaladas para satisfacer la demanda energética definida en la tabla anterior. En la Tabla 26 se muestran las potencias instaladas para este.

Tabla 26: Resultados de Optimización de potencias instaladas y su corrección por ajuste horario Zona Centro-Sur (Elaboración Propia).

	Potencia Instalada Solar Optimizada [kW]	Potencia Instalada Solar Corregida [kW]	Potencia Instalada Eólica Optimizada [kW]	Potencia Instalada Eólica Corregida [kW]
Zona Centro-Sur	58	180	73	180

4.2.1. Resultados Generación Eléctrica

En la Tabla 27 se muestran las generaciones mensuales y anuales para cada tecnología en la Zona Centro-Sur. La Figura 40 presenta gráficos de la generación de cada tecnología para ambos casos, junto con la demanda establecida.

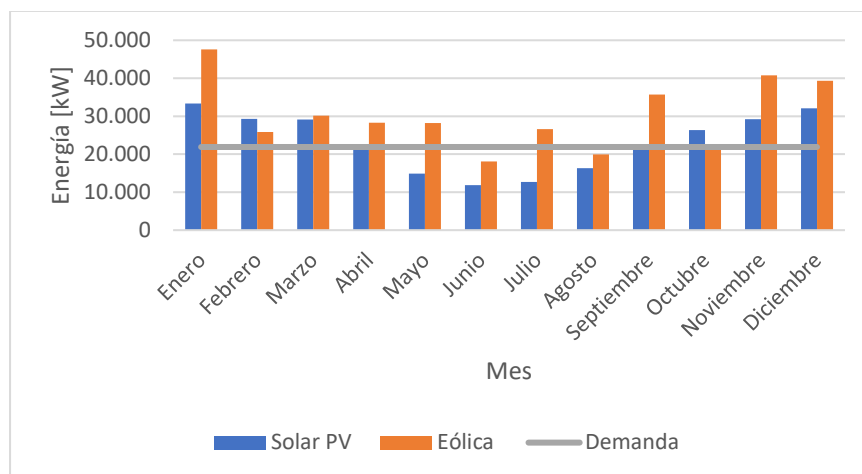


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

*Tabla 27: Generación mensual y anual de los Sistemas de Generación Zona Centro-Sur
(Elaboración Propia).*

Mes	Caso Base		Caso Optimizado	
	Solar PV [kWh]	Eólica [kWh]	Solar PV [kWh]	Eólica [kWh]
Enero	33,383	47,556	33,383	47,556
Febrero	29,332	25,818	29,332	25,818
Marzo	29,127	30,121	29,127	30,121
Abril	21,884	28,268	21,884	28,268
Mayo	14,887	28,239	14,887	28,239
Junio	11,845	18,130	11,845	18,130
Julio	12,671	26,592	12,671	26,592
Agosto	16,351	19,962	16,351	19,962
Septiembre	22,602	35,689	22,602	35,689
Octubre	26,382	22,672	26,382	22,672
Noviembre	29,193	40,792	29,193	40,792
Diciembre	32,057	39,329	32,057	39,329
Total Anual	279,715	363,173	279,715	363,173

En la Zona Centro-Sur, las potencias instaladas para ambas fuentes de generación son idénticas en ambos casos. Este resultado se debe a las correcciones realizadas en la generación horaria para el caso optimizado



*Figura 40: Demandas mensuales, Generación mensual Eólica y Solar Fotovoltaica Zona Centro-Sur
(Elaboración Propia).*



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

La Tabla 28 presenta la generación anual, la demanda y el excedente disponible para ambos casos, destinado a la generación de hidrógeno verde

Tabla 28: Generación anual, Demanda anual y Excedente de generación Zona Centro-Sur (Elaboración Propia).

	Generación Anual [kWh]	Demanda anual [kWh]	Excedente de Generación [kWh]
Caso Base y Optimizado	642,888	262,800	380,088

En las Figuras 41 y 42 se presenta el análisis horario de las fuentes de generación, la demanda residencial y el porcentaje de carga de las baterías. Para los días típicos definidos para invierno y verano.

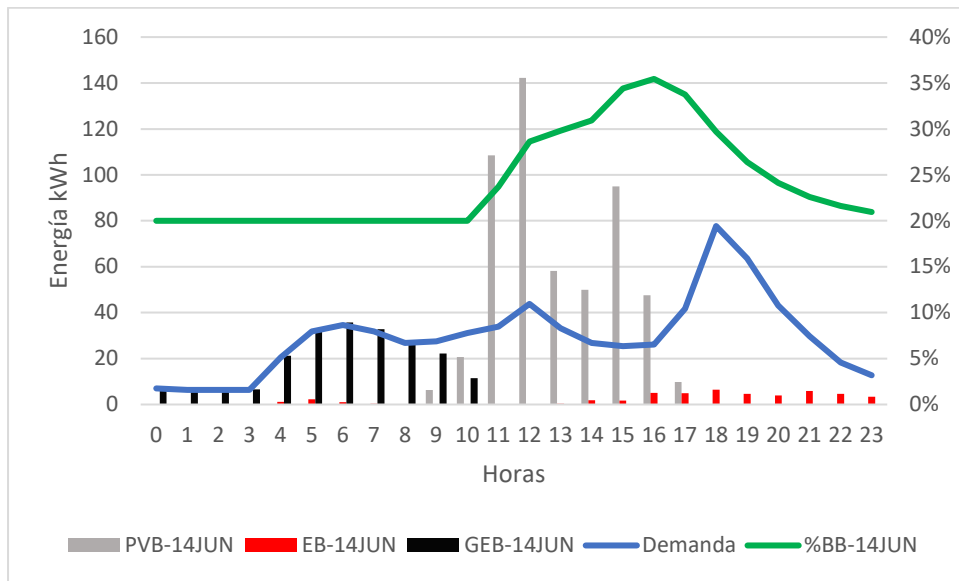


Figura 41: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 14 de junio para Caso Base y Optimizado Zona Centro-Sur (Elaboración Propia).

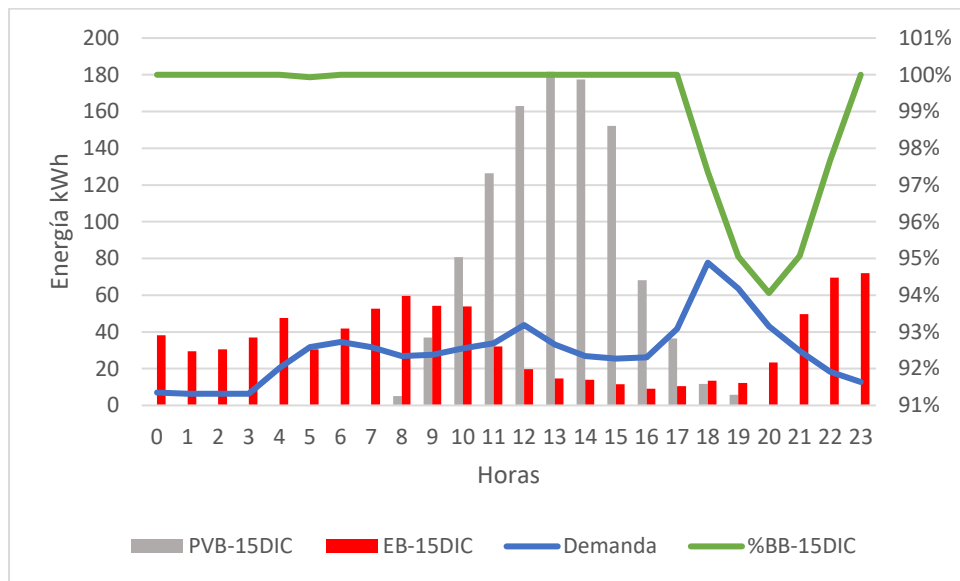


Figura 42: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 15 de diciembre para Caso Base y Optimizado Zona Centro-Sur (Elaboración Propia).

En la Zona Centro-Sur, durante el invierno, tomando como día típico el 14 de junio, la producción de energía renovable se basa principalmente en el sistema de generación solar fotovoltaico. Este sistema permite cubrir la demanda de energía y cargar las baterías para abastecer la demanda entre las 11:00 y las 23:00 horas. Durante la mañana, el sistema de generación solar no produce energía, lo que lleva a que las baterías alcancen su nivel mínimo de carga. Por lo tanto, es necesario que el sistema de respaldo basado en combustibles fósiles cubra esa demanda desde las 00:00 hasta las 11:00 horas.

Por otro lado, el 15 de diciembre, considerado como día típico de verano, la generación de energía es capaz de cubrir la demanda, excepto en el horario de 17:00 a 20:00 cuando ambos sistemas de generación por energías renovables disminuyen. Es en este momento cuando las baterías suministran energía, descargándose un 6% de su capacidad. En ambos casos, se observa que la generación eólica logra cubrir la demanda en los períodos en los que el sistema solar no está operativo, y durante la tarde, la energía solar fotovoltaica satisface la demanda.



4.2.2. Resultados Generación Hidrógeno

Con los excedentes de energía obtenidos, se calcula la generación de hidrógeno verde utilizando el modelo según la configuración y parámetros establecidos para cada caso. En la Tabla 29 se presenta la energía disponible para uso de los electrolizadores, la energía utilizada por los electrolizadores, el porcentaje de uso de la energía disponible, la cantidad de hidrógeno producido, las horas de operación de los electrolizadores, los factores de planta y la cantidad de electrolizadores utilizados para ambos casos analizados.

Tabla 29: Producción de Hidrógeno Verde Zona Centro-Sur (Elaboración Propia).

	Caso Base	Caso Optimizado
Energía Disponible [kWh]	380,088	380,088
Energía Utilizada [kWh]	94,955	195,661
Energía Utilizada	25%	51%
Hidrogeno Producido [kg]	1,775	3,657
Horas Operación Elect [h]	3,153	2,795
Factor de Planta	36%	32%
Cant. Electrolizadores	3	7

La producción de hidrógeno aumenta en un 106% entre el caso base y el optimizado. Además, el consumo de energía en el caso optimizado alcanza el 51%, reflejando una mayor eficiencia en la utilización de los excedentes de energía.



4.3. Resultados Generación Eléctrica e Hidrógeno Zona Austral

Las potencias instaladas del caso base fueron definidas previamente en la metodología. A partir de estas potencias, se determinó la demanda de energía que puede satisfacer este sistema. En la Tabla 30 se presentan la demanda mensual, anual y la capacidad de almacenamiento del sistema.

Tabla 30: Demanda mensual, anual y almacenamiento Zona Austral (Elaboración Propia).

Zona Austral	kWh
Demanda mensual	52,000
Demanda anual	624,000
Almacenamiento por baterías	4,650

Para el caso optimizado, se ajustaron las potencias instaladas con el fin de satisfacer la demanda energética definida en la tabla anterior. A continuación, en la Tabla 31 se presentan dichos ajustes.

Tabla 31: Resultados de Optimización de potencias y su corrección por ajuste horario Zona Austral (Elaboración Propia).

	Potencia Instalada Solar Optimizada [kW]	Potencia Instalada Solar Corregida [kW]	Potencia Instalada Eólica Optimizada [kW]	Potencia Instalada Eólica Corregida [kW]
Zona Austral	49	50	114	255

4.3.1. Resultados Generación Eléctrica

En la Tabla 32 se muestran las generaciones mensuales y anuales para cada tecnología en la Zona Austral. La Figura 43 representa gráficamente la generación de cada tecnología para ambos casos y la demanda establecida.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Tabla 32: Generación mensual y anual de los Sistemas de Generación Zona Austral (Elaboración Propia).

Mes	Caso Base		Caso Optimizado	
	Solar PV [kWh]	Eólica [kWh]	Solar PV [kWh]	Eólica [kWh]
Enero	22,479	78,771	5,395	124,720
Febrero	18,375	64,516	4,410	102,150
Marzo	18,154	76,629	4,357	121,329
Abril	17,041	72,715	4,090	115,133
Mayo	15,931	42,183	3,823	66,789
Junio	12,783	82,234	3,068	130,205
Julio	14,310	71,987	3,434	113,979
Agosto	15,954	72,203	3,829	114,321
Septiembre	16,689	40,703	4,005	64,447
Octubre	19,862	69,326	4,767	109,767
Noviembre	19,685	85,460	4,725	135,312
Diciembre	23,915	85,327	5,740	135,101
Total Anual	215,177	842,058	51,643	1,333,259

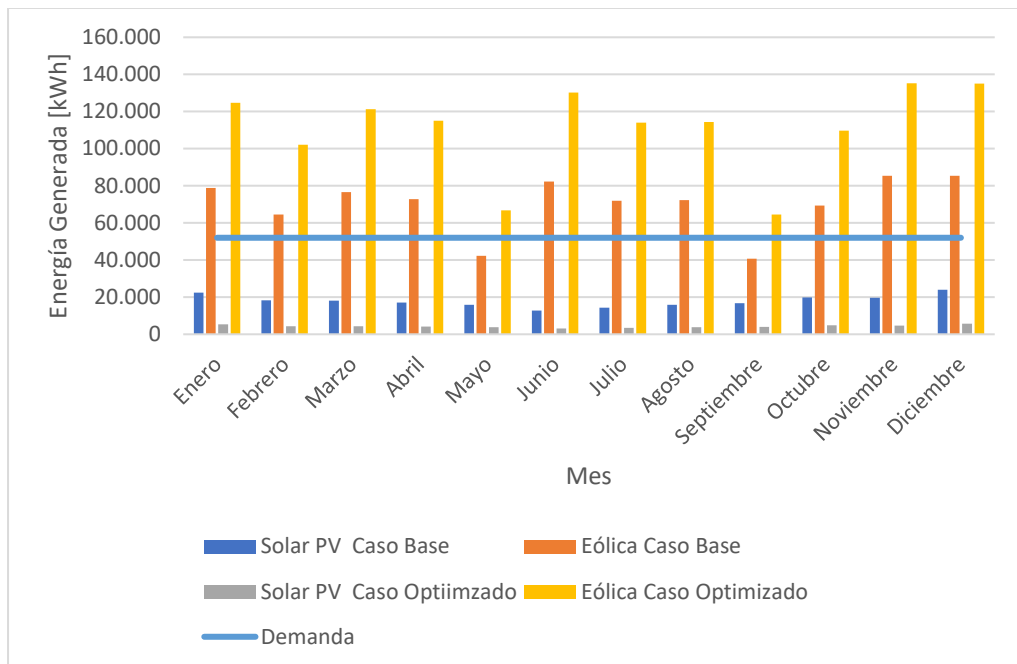


Figura 43: Demandas mensuales, Generación mensual Eólica y Solar Fotovoltaica Zona Austral (Elaboración Propia).



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

La potencia instalada de energía solar fotovoltaica en el caso optimizado se reduce en un 72% con respecto al Caso Base, lo que se traduce en una reducción de generación de energía eléctrica de 163.534 kWh. Por otro lado, la potencia instalada eólica se incrementa en un 58%.

*Tabla 33: Generación Anual, Demanda anual y excedente de generación Zona Austral
(Elaboración Propia).*

	Generación Anual [kWh]	Demanda anual [kWh]	Excedente de Generación [kWh]
Caso Base	1,057,235	624,000	433,235
Caso Optimizado	1,384,902	624,000	760,902

La Tabla 33 muestra la generación anual, la demanda anual y el excedente de generación disponible para la producción de hidrógeno verde. El excedente en el caso optimizado es superior a la demanda debido a que la principal fuente de generación en el sistema es la eólica. Durante períodos de baja generación eólica se requiere una mayor cantidad de generadores para cubrir la demanda del sistema, lo que resulta en un excedente mayor cuando la capacidad de generación es alta.

En las Figuras 44, 45, 46 y 47 se presenta el análisis horario de las fuentes de generación, la demanda residencial y el porcentaje de carga de las baterías. Los días típicos representados para los dos casos son el 14 de Junio y el 15 de Diciembre.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
 SANTIAGO – CHILE

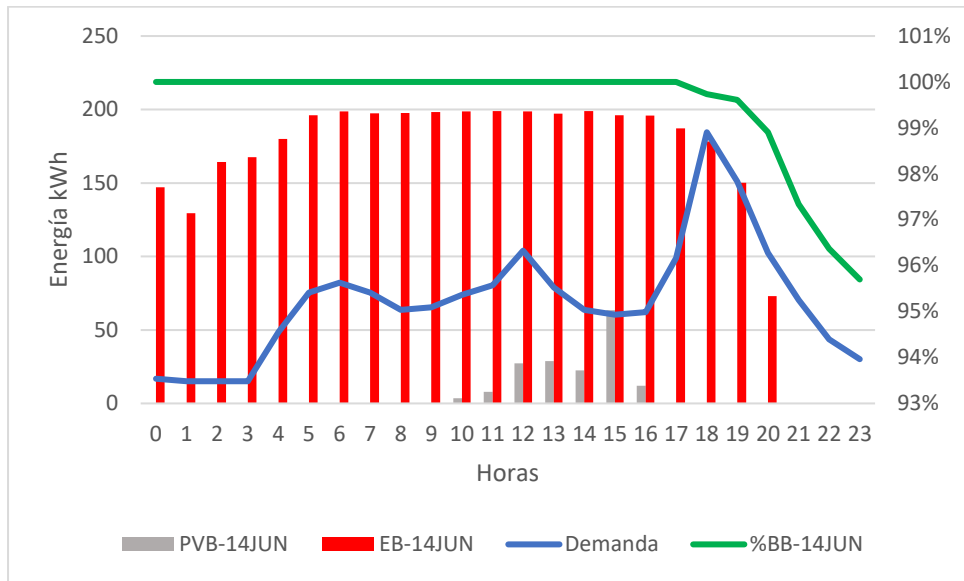


Figura 44: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 14 de junio para Caso Base Zona Austral (Elaboración Propia).

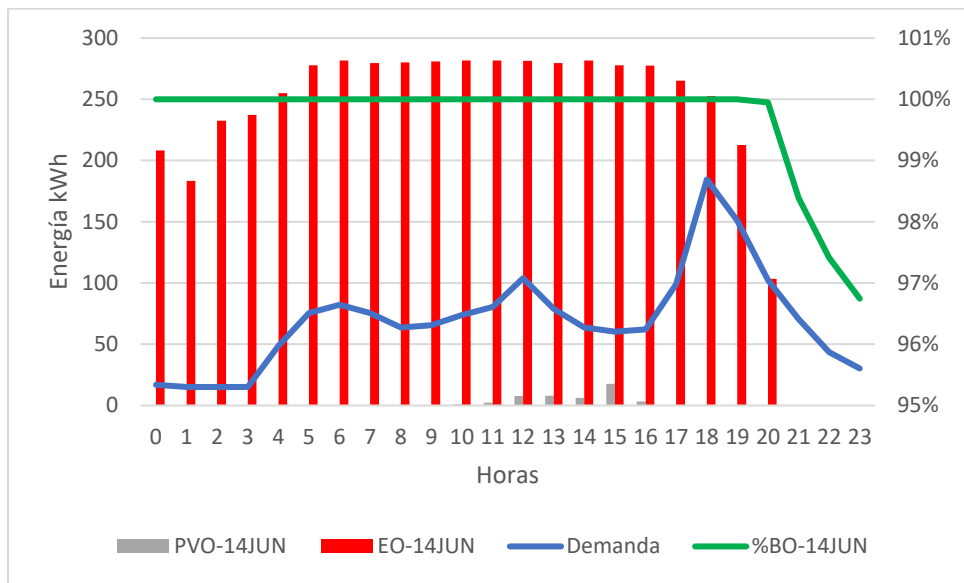


Figura 45: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 14 de junio para Caso Optimizado Zona Austral (Elaboración Propia).



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

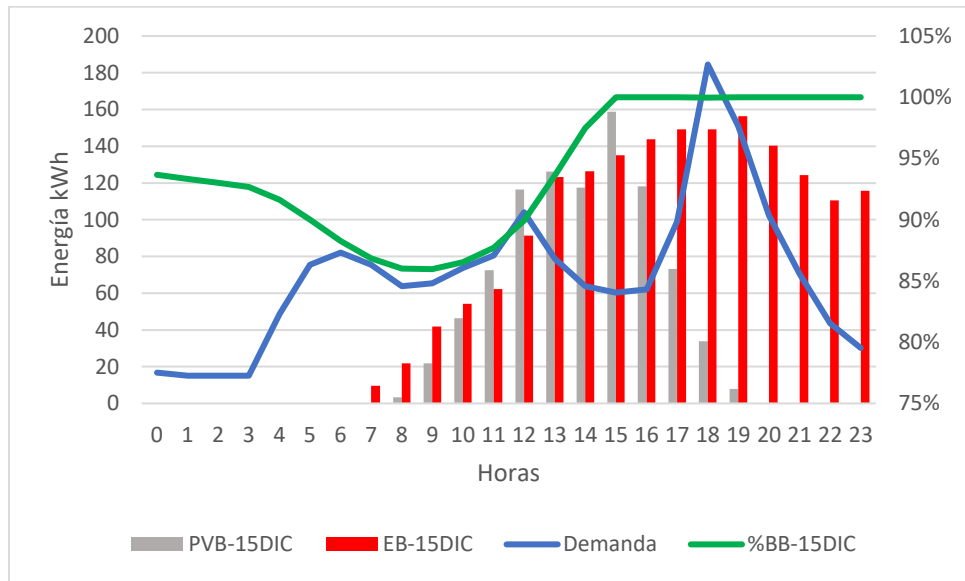


Figura 46: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 15 de diciembre para Caso Base Zona Austral (Elaboración Propia).

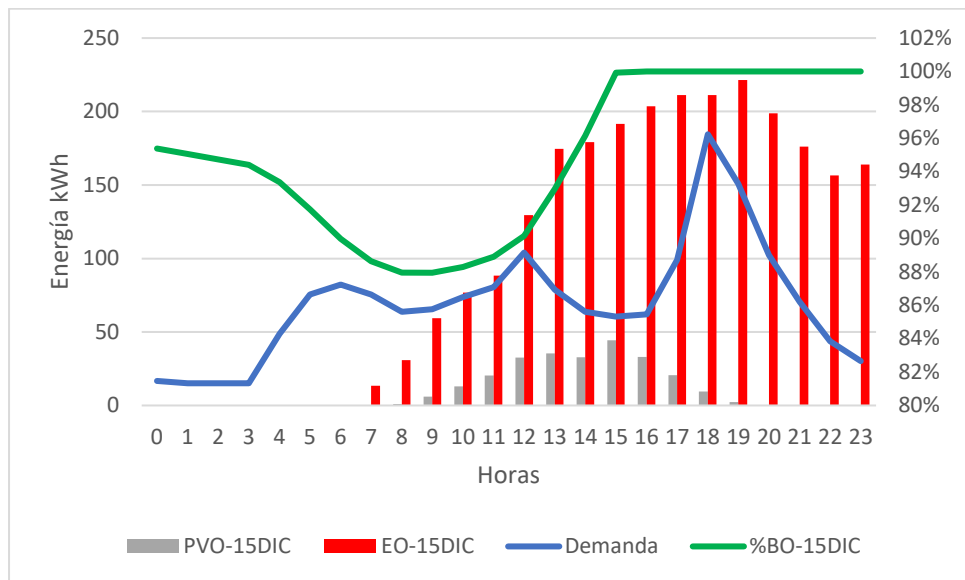


Figura 47: Generación, Demanda y Porcentaje de carga de baterías para el 15 de diciembre para Caso Optimizado Zona Austral (Elaboración Propia).

En la zona austral, durante el invierno, la producción de energía renovable se basa principalmente en el sistema de generación eólica, coincidiendo con el periodo de mayor generación eólico durante el año. Como se puede observar en las figuras 44 y 45, la



producción de energía eléctrica supera significativamente a la demanda, decayendo solo durante la noche, cuando las baterías suplen la demanda, descargándose solo un 5% como máximo en el caso base.

Por otro lado, el 15 de diciembre, la generación de energía es suministrado por ambos sistemas. Desde la medianoche hasta las 7:00 horas, no hay generación de los sistemas, por lo que las baterías deben suministrar la energía demandada, descargándose 14%. Desde las 7:00 a 23:00 horas, se concentra la generación de energía solar fotovoltaico y eólico, permitiendo recargar las baterías al 100% y cubrir la demanda.

4.3.2. Resultados Generación Hidrógeno

Con los excedentes de energía obtenidos, se calcula la generación de hidrógeno verde utilizando el modelo según la configuración y parámetros establecidos en cada caso. La Tabla 34 presenta la energía disponible para uso de los electrolizadores, la energía utilizada por los electrolizadores, el porcentaje de uso de la energía disponible, la cantidad de hidrógeno producido, las horas de operación de los electrolizadores, los factores de planta y la cantidad de electrolizadores utilizados para ambos casos analizados.

Tabla 34: Producción de Hidrógeno Verde Zona Austral (Elaboración Propia).

	Caso Base	Caso Optimizado
Energía Disponible [kWh]	433,235	760,902
Energía Utilizada [kWh]	100,673	389,498
Energía Utilizada	23%	51%
Hidrogeno Producido [kg]	1.882	7.281
Horas Operación Elect [h]	3,328	4,518
Factor de Planta	38%	52%
Cant. Electrolizadores	3	11



La producción de hidrógeno aumenta en un 287% entre el caso base y el optimizado. Además, el consumo de energía en el caso optimizado representa el 51% del excedente de energía disponible.

4.3 Resultados Económicos

4.3.1 Costo Nivelado de Energía

Los detalles de los costos para cada caso y zona geográfica se encuentran en el Anexo 4. En la zona Norte, el Caso base presenta un costo nivelado de energía de 270 USD/MWh, con un potencial de generación anual de 1,288,502 kWh, de los cuales se consumen 957,121 kWh. Esto incluye la demanda energética del sistema y la requerida por los electrolizadores, lo que equivale a un aprovechamiento del potencial de generación del 74%. En contraste, el Caso Optimizado y corregido tiene un potencial de generación de 1,150,561 kWh anual y un consumo de 1,006,814 kWh, lo que representa un aprovechamiento del 87% y se refleja en la reducción del LCOE a 251 USD/MWh, una mejora del 7% respecto al Caso Base.

En la Zona Centro-Sur, el Caso Base muestra un LCOE de 383 USD/MWh, con un potencial de generación anual de 642,888 kWh y un consumo efectivo de 357,755 kWh, lo que corresponde al 56% de la energía generada. Por otro lado, el Caso Optimizado y Corregido si bien tuvo la misma potencia instalada por tecnología de generación, estableció que el sistema de generación de hidrógeno tuviese que utilizar 50% o más del excedente de energía eléctrica posterior a satisfacer la demanda, lo que se tradujo en utilizar 458,461 kWh de los 642,888 disponibles, aumentando el uso de la energía al 71% y reduciendo significativamente el costo nivelado de energía a 289 USD/MWh. Lo que equivale a una reducción del LCOE en un 24%.

En la Zona Austral, El Caso Base tiene un costo nivelado de la energía de 289 USD/MWh, utilizando 724,673 kWh anuales en satisfacer la demanda y la generación de hidrógeno, lo que representa el 69% de la generación anual del sistema. En contraste, el Caso Optimizado y Corregido tuvo el mismo porcentaje de uso de la energía eléctrica disponible,



el potencial anual fue de 1,384,902 kWh y se utilizó 955,125 kWh, logrando una reducción del costo nivelado a 215 USD/MWh, lo que representa una mejora en el indicador de 25%.

En la Tabla 35, se presentan los resultados del LCOE para los dos casos estudiados y las zonas.

Tabla 35: Comparación de LCOE y Generación por Zonas y Casos (Elaboración Propia).

	Zona Norte		Zona Centro-Sur		Zona Austral	
	Caso Base	Caso Opt-Corregido	Caso Base	Caso Opt-Corregido	Caso Base	Caso Opt-Corregido
LCOE (USD/MWh)	270	251	383	289	289	215
Consumo Energía [kWh]	957,121	1,006,814	357,755	458,461	724,673	955,125

Como presentaron Come et al (2021)[42] en su artículo “ A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries”, se proporcionó información sobre el costo nivelado de la energía para sistemas off-grid exclusivamente. En este, se menciona que el LCOE para sistemas híbridos que incluyen energía solar fotovoltaica, eólica, baterías y respaldo con generador diésel tienen un LCOE de 410-760 USD/MWh. Aunque estos proyectos varían según ubicación, potencia instalada por tecnología, autonomía del sistema y la demanda contemplada, proporcionan un rango de costos para este tipo de proyectos. Al compararlos con los obtenidos en todas las zonas y casos de estudio, los valores obtenidos son inferiores al rango mencionado. En consecuencia, desde un punto de vista económico, los LCOE analizados en esta memoria son competitivos en el mercado mundial para sistemas off-grid, considerando los potenciales energéticos a lo largo de Chile y adaptando las tecnologías a este potencial.

4.3.1 Costo Nivelado de Hidrógeno

Los detalles de los costos para cada caso y zona geográfica se encuentran detallados en el Anexo 5. En la zona Norte, el Caso base presenta un costo nivelado de hidrógeno 15.9 USD/kgH₂ con una generación de 1,842 kg utilizando 3 electrolizadores (30kW).



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Comparándolo con el caso optimizado donde se tienen 6 electrolizadores con una potencia instalada de 60kW, generando 2,771 kg y que presenta un LCOH 16.8 USD/kgH₂. Lo que representa un 50% de aumento en la producción, pero un aumento en el costo de 5%.

En la Zona Centro-Sur, El caso Base tiene un costo nivelado de 16.5 USD/kgH₂ con los 3 electrolizadores instalados y produciendo 1,755 kg. El caso optimizado presenta un costo nivelado de 14.2 USD/kgH₂ con una generación de 3,658 kg y una potencia instalada de 70kW. Lo que significa una reducción 13% del LCOH y un aumento en la producción del 108%.

En la Zona Austral, el caso optimizado tiene un LCOH de 10.0 USD/kgH₂ con una potencia instalada de 90 kW generando 6,190 kg. En contraste con el caso Base que tiene un costo de 15.5 USD/kgH₂ y genera 1,882 kg para 3 electrolizadores. En términos porcentuales significa un aumento en la producción del 229% y una reducción del 35% del costo nivelado. Los resultados se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36: Comparación LCOH, generación de hidrógeno y cantidad de electrolizadores por zona y casos (Elaboración Propia).

	Zona Norte		Zona Centro-Sur		Zona Austral	
	Caso Base	Caso Opt-Corregido	Caso Base	Caso Opt-Corregido	Caso Base	Caso Opt-Corregido
LCOH [USD/kgH₂]	15.9	16.8	16.5	14.2	15.5	10.0
Generación H₂ [kg]	1,842	2,771	1,755	3,658	1,882	6,190
Cantidad Electrolizadores	3	6	3	7	3	9

De lo observado en las distintas zonas y sus casos, se puede concluir que los costos nivelados de hidrógeno se ven beneficiados por: Factores de escala al aumentar las potencias instaladas; Aumento en el excedente de generación y en consecuencia en el factor de planta de los electrolizadores, donde la excepción es la zona norte justamente por el bajo factor de planta.



Si se comparan los costos nivelados, según los datos de la IEA en su informe “ Global Hydrogen Review 2023” [43], el coste nivelado de hidrógeno utilizando electrolizadores está en el rango de 3.4-12 USD/kgH₂ al 2022, y que el precio objetivo al 2030 es de 3 USD/kgH₂ y para ser competitivo debe estar en torno al 2 USD/kgH₂. Los costos indicados en este informe son para plantas de generación exclusivas para la producción de hidrógeno. En los casos estudiados en esta memoria se analiza la producción de hidrógeno orientado al aprovechamiento del excedente energético de un sistema de generación eléctrico off-grid para generar valor donde se estaría perdiendo, los LCOH están entre 10.0-16.8 USD/kgH₂, por lo que, al compararlo con el rango del mercado al 2022, todos se encuentran fuera de rango exceptuando la zona austral en el caso optimizado, si uno observa el contexto nacional el gran polo de desarrollo del hidrógeno verde se encuentra justamente en esta zona geográfica debido a los altos factores de planta de la energía eólica que permiten un mayor tiempo de operación de los electrolizadores.

Es crucial señalar que en este documento no se ha tenido en cuenta la posible venta de oxígeno generado como subproducto, ni se han explorado las oportunidades de aprovechamiento de calor cogenerado por los electrolizadores. La consideración de estos aspectos podría aumentar la rentabilidad de los proyectos evaluados, impactando directamente en los costos nivelados de hidrógeno.

En este trabajo se tuvo por objetivo determinar la potencia óptima para viabilizar la instalación de módulos de generación de hidrógeno en un sistema off-grid. Sin embargo, tras obtener y analizar los resultados, se ha concluido que, al tratarse de un sistema aislado de la matriz energética, existen multiplicidad de factores que definen los criterios de diseño como la capacidad de inversión, las necesidades de autonomía, el potencial energético del lugar y la demanda de consumo energético específica. Estos elementos influyen en el excedente de energía disponible y por ende en la operación de los electrolizadores, afectando así al costo nivelado de hidrógeno. Ahora bien, como se analizó en esta memoria imponer un criterio de utilización del excedente de energía mejora los indicadores de LCOE y LCOH a partir de la generación de valor por medio de la producción de hidrógeno.



5. Conclusiones y recomendaciones finales

5.1. Conclusiones

En esta investigación, se hizo un modelado de la generación de energía eléctrica por paneles fotovoltaicos y aerogeneradores, almacenamiento por baterías, demanda y generación de hidrógeno verde que permite realizar un análisis de prefactibilidad técnico y económico de proyectos off-grid en Chile.

Uno de los hallazgos significativos radica en la influencia de los costos asociados al almacenamiento por baterías y los costos de la generación de hidrógeno en los costos nivelados de energía y de hidrógeno. En los próximos años, estos costos deberían disminuir, gracias al contexto de transición energética, al desarrollo de las tecnologías y al mejoramiento de los fabricantes en sus líneas productivas.

Es crucial señalar que, aunque los costos nivelados de energía resultaron ser más elevados que los del mercado sin distinción entre off-grid y on-grid, se evidenció una ventaja al compararlos específicamente con los sistemas off-grid. Las instalaciones aisladas de la matriz energética, que surgen como respuesta a zonas rurales o geográficamente alejadas sin acceso a la red eléctrica nacional, presentan costos más elevados al no beneficiarse de las economías de escala. En este contexto, la inversión para extender la matriz, puede ser incluso superior a la implementación de sistemas off-grid. Actualmente, estas comunidades y empresas dependen principalmente de generadores que operan con combustibles fósiles, y los sistemas analizados en este trabajo se presentan como una alternativa sostenible y viable.

Dentro de los sistemas energéticos estudiados, el sistema de generación de hidrógeno resultó en valores elevados de LCOH en comparación con el mercado; se destaca la posibilidad de mejorar los rendimientos considerando aspectos no incluidos en esta memoria como la venta de oxígeno y la utilización del calor generado por los electrolizadores.

Al buscar la potencia óptima para instalar un sistema de generación por hidrógeno verde reveló una gran variabilidad en los casos estudiados, dependiente de factores como la



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

potencia instalada de generación por tecnología, el potencial de generación, la capacidad de almacenamiento y la demanda evaluada. En conclusión, la viabilidad económica del proyecto conjunto se ve muy afectada por la maximización del uso de los electrolizadores, dado los altos costos de inversión.

Entre los beneficios destacables de las instalaciones off-grid se encuentra la mayor independencia energética, al no depender de los fluctuantes precios de la energía y del combustible. Estos precios, sujetos a variaciones por factores externos, pueden afectar significativamente a las comunidades o empresas que utilizan estos sistemas.

En un contexto internacional marcado por crisis inflacionarias, conflictos entre países productores de fuentes de energías y medidas gubernamentales para promover la transición energética, podrían llevar a que en los próximos años se experimenten alzas.

En base a las medidas gubernamentales, Chile, reconocido como potencia energética, concentra sus esfuerzos en fomentar la descarbonización de la industria, destacándose por su apuesta a la integración de energías renovables no convencionales en su matriz. Este enfoque abre la posibilidad de obtener beneficios tributarios o créditos a tasas reducidas, lo que contribuiría significativamente a mejorar las evaluaciones económicas de los proyectos.

En última instancia, para facilitar el desarrollo de esta investigación, se implementó una calculadora, que a partir de los datos TMY de la zona, datos técnicos de las tecnologías utilizadas, costos y precios de venta de las energías involucradas, permite realizar cálculos de prefactibilidad técnica y económica del proyecto considerando las potencias instaladas de generación solar fotovoltaica, eólica, generación de hidrógeno, producción de energía eléctrica por hidrógeno y capacidad de almacenamiento requeridas.



5.2. Recomendaciones finales

Algunas recomendaciones que se podrían mencionar para mejorar el LCOE y LCOH de los proyectos off-grid con almacenamiento y generación de hidrógeno verde, son las siguientes:

- Buscar clientes que requieran oxígeno que, si bien no se ha mencionado en esta memoria, es un subproducto de la electrólisis que se podría aprovechar para venderlo y generar mayores ingresos.
- Utilizar el calor generado por los electrolizadores en calefacción para la comunidad/empresa o para procesos productivos que así lo requieran, agregándole valor y generando mayores ingresos a la instalación.
- Si se aumenta el tamaño de generación solar y eólica para obtener mayores excedentes para la producción de hidrógeno y considerando mayor capacidad de almacenamiento, disminuye el LCOH al aumentar el tiempo de uso de los electrolizadores, además de beneficiarse por las economías de escala, disminuyendo los costos de inversión por kW instalado.
- Realizar una investigación con respecto a los costos de las tecnologías, ya que, al estar desarrollándose grandes proyectos de energías renovables no convencionales con almacenamiento y proyectos de hidrógeno verde, llevan a que la industria productiva desarrolle nuevos procesos que permitan disminuir los costos considerablemente.
- Dado el contexto de Chile, con las políticas públicas de desarrollo de una matriz cero carbonos, las oportunidades de financiamiento impulsadas por distintos entes gubernamentales son posibles.



6. Referencias

- [1] Nadimi, R., & Tokimatsu, K. (2018). Energy use analysis in the presence of quality of life, poverty, health, and carbon dioxide emissions. *Energy* (Oxford, England), 153, 671–684.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.150>
- [2] Tsvetkov, P., Rodriguez, S., Ames, D., II, & Rochau, G. (2010). High fidelity nuclear energy system optimization towards an environmentally benign, sustainable, and secure energy source. Office of Scientific and Technical Information (OSTI).
- [3] International Energy Agency. (2022). *World energy outlook 2022*. OECD.
- [4] Bp Statistical Review of World Energy 2022 (71st edition). (2022, Junio 28). BIEE; British Institute of Energy Economics. <https://www.biee.org/bp-statistical-review-of-world-energy-2022-71st-edition/>
- [5] Renewable energy and jobs - annual review 2022. (s/f). Irena.org.
Recuperado el 27 de junio de 2023, de <https://www.irena.org/publications/2022/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2022>
- [6] Biblioteca del Congreso Nacional. (s/f). Ley 20.698 Fomento de Las Energías Renovables No Convencionales . Recuperado el 2 de agosto de 2024, de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1055402>
- [7] García, N. (s/f). Matriz energética y eléctrica en Chile Autor. Bcn.cl.
Recuperado el 27 de junio de 2023, de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32492/1/BCN_Matriz_energetica_electrica_en_Chile.pdf



- [8] Ehrlich, R. (2013). Renewable Energy: A first course. CRC
- [9] Reyes, M. (2023). Fundamentos de Astronomía y Geometría Solar. Presentación en el curso de Heliotecnia, Universidad Federico Santa María.
- [10] Explorador solar. (s/f). Minenergía.Cl. Recuperado el 28 de junio de 2023, de <https://solar.minenergia.cl/inicio>
- [11] Tipos de Paneles Fotovoltaicos. (2017, agosto 18). Tritec Intervento; TRITEC-Intervento. <https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>
- [12] SotySolar. (2023). Seguidores solares: todo lo que necesitas saber SotySolar. <https://sotysolar.es/placas-solares/seguidores-solares>
- [13] Explorador eólico. (s/f). Minenergía.Cl. Recuperado el 28 de junio de 2023, de <https://eolico.minenergia.cl/inicio>
- [14] Aerogeneradores de eje vertical. (2010, abril 11). Consumer |; Eroski Consumer. <https://www.consumer.es/medio-ambiente/aerogeneradores-de-eje-vertical.html>
- [15] Corporativa, I. (s/f). Qué es un aerogenerador y cómo funciona. Iberdrola. Recuperado el 28 de junio de 2023, de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>
- [16] Guacaneme, J. A., Velasco, D., & Trujillo, C. L. (2014). Revisión DE Las características DE sistemas DE almacenamiento DE energía para



- aplicaciones en micro Redes. CIT Información Tecnológica, 25(2), 175–188. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642014000200020>
- [17] Cavallo, A. J. (2001). Energy storage technologies for utility scale intermittent renewable energy systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 123(4), 387–389. <https://doi.org/10.1115/1.1409556>
- [18] IRENA. (2017). *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*
- [19] Castro, Domínguez & Villaseñor. (2019). *Sistemas de Almacenamiento mediante baterías electroquímicas. Contribución a la integración de energías renovables*. Universidad Carlos III de Madrid.
- [20] Universidad Católica de Uruguay. (2022). *Observatorio de energía y desarrollo sustentable. Monitor Hidrogeno Verde*. Recuperado el 28 de junio de 2023, de undp-uy-Monitor-Hidrogeno-Verde-2022.pdf
- [21] IEA (2019). *The Future of Hydrogen*. Recuperado el 2 de agosto de 2024, de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [22] Sanchez.M, Amores.E, Rodriguez.L, Clemente-Jul.C.(2017). *Modelado y simulación de sistemas de producción de hidrógeno vía electrolisis alcalina a partir de energías renovables*.
- [23] Keçebaş, A., Kayfeci, M. & Bayat, M. (2019). Electrochemical hydrogen generation. *Solar Hydrogen Production*, 299-317. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814853-2.00009-6>
- [24] Sebbahi, S., Nabil, N., Alaoui-Belghiti, A., Laasri, S., Rachidi, S. & Hajjaji, A. (2022). Assessment of the three most developed water electrolysis technologies: Alkaline Water Electrolysis, Proton Exchange Membrane and Solid-Oxide Electrolysis. *Materials Today: Proceedings*, 66, 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.264>



- [25] H. Barthelemy, M. Weber, F. Barbier, Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 11, 2017, Pages 7254-7262, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178>.
- [26] Roberts, Justo & Thibaud, Soledad & Prado, Pedro. (2015). Proyecto De Un Sistema Híbrido De Generación Con Energías Renovables Para Un Establecimiento Rural Aislado.
- [27] L. Valverde, F. Rosa, A.J. del Real, A. Arce, C. Bordons, Modeling, simulation and experimental set-up of a renewable hydrogen-based domestic microgrid, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 38, Issue 27, 2013, Pages 11672-11684, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.06.113>.
- [28] Shakti Singh, Prachi Chauhan, Nirbhow Jap Singh, Capacity optimization of grid connected solar/fuel cell energy system using hybrid ABC-PSO algorithm, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 16, 2020, Pages 10070-10088, ISSN 0360-3199
- [29] S.K.V. Harish, Naqui Anwer, Amit Kumar, Applications, planning and socio-techno-economic analysis of distributed energy systems for rural electrification in India and other countries: A review, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 52, Part A, 2022, 102032, ISSN 2213-1388, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102032>.
- [30] Qusay Hassan, Sameer Algburi, Aws Zuhair Sameen, Hayder M. Salman, Marek Jaszczur, A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications, Results in Engineering, Volume 20, 2023, 101621, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>.



- [31] Vásquez, C., Valdivia, D., Sepúlveda, H., & García, M. (2021). Identificación y cuantificación de Potenciales de Energías Renovables 2021. Recuperado de https://exploradores.minenergia.cl/portal-ernc/websites/ICPER_2021_v2.pdf
- [32] Leiva.R. Calculadora de Cogeneración - Sección 1. Cogeneraeficiente.cl. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://calculadora.cogeneraeficiente.cl/seccion/1>
- [33] Miranda, Eduardo. (2018). Modelo matemático de un Panel FV.
- [34] Iglesias, R., Lago, A., Nogueiras, A., Martínez-Peñalver, C., Marcos, J., Quintans, C., ... & Valdés, M. D. (2012). Modelado y simulación de una batería de ion-litio comercial multicelda. Semanario anual de automática, electrónica industrial e instrumentación, 19.
- [35] D. Guilbert and G. Vitale, "Experimental Validation of an Equivalent Dynamic Electrical Model for a Proton Exchange Membrane Electrolyzer," 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, Italy, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2018.8494523.
- [36] Sinaga, Rusman & Tuati, Nonce & Beily, Marthen & Sampeallo, Agusthinus. (2019). Modeling and analysis of the solar photovoltaic levelized cost of electricity (LCoE) - case study in Kupang. Journal of Physics: Conference Series. 1364. 012066. 10.1088/1742-6596/1364/1/012066.



- [37] Tarifa de Suministro. (s/f). CGE. Recuperado el 2 de agosto de 2024, de <https://www.cge.cl/informacion-comercial/tarifas-y-procesos-tarifarios/tarifa-de-suministro/>
- [38] Enap. (s/f). Enap.cl. Recuperado el 2 de agosto de 2024, de <https://www.enap.cl/archivos/8/informe-semanal-de-precios?year=2024>
- [39] Ou Tang, Jakob Rehme, Pontus Cerin, Levelized cost of hydrogen for refueling stations with solar PV and wind in Sweden: On-grid or off-grid, Energy, Volume 241,2022,122906, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122906>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221031558>)
- [40] Preguntas Frecuentes. (s/f). Planhidrogenoverde.cl. Recuperado el 2 de agosto de 2024, de <https://www.planhidrogenoverde.cl/preguntas-frecuentes/>
- [41] Liu, L., Zhai, R., & Hu, Y. (2023). Performance evaluation of wind-solar-hydrogen system for renewable energy generation and green hydrogen generation and storage: Energy, exergy, economic, and enviroeconomic. Energy (Oxford, England), 276(127386), 127386. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127386>
- [42] Come. E, van der Windt. H, Nhumaio G, Faaij. A, A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 144,2021,111036, ISSN 1364-0321
- [43] IEA. (2023). Global Hydrogen Review 2023.December. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>



- [44] Berkhout, V. (s/f). Renewable Power Generation Costs in 2021. Irena.org. Recuperado el 27 de junio de 2023, de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Generation_Costs_2021.pdf?rev=34c22a4b244d434da0accde7de7c73d8
- [45] De, U., & Renovables, E. (s/f). Declaración de Instalaciones Fotovoltaicas Sin Inyección de Energía a la Red e Instalaciones Fotovoltaicas Aisladas. Sec.cl. Recuperado el 27 de junio de 2023, de <https://www.sec.cl/sitio-web/wp-content/uploads/2019/07/DECLARACION3N20TE-120ERNCL.pdf>
- [46] HelioEsfera. (2019, octubre 20). La radiación solar. HelioEsfera. <https://www.helioesfera.com/la-radiacion-solar/>
- [47] Mikati, M., Santos, M., & Armenta, C. (2012). Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 9(3), 267–281. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2012.05.010>
- [48] Esteban, A., Medina, C., Ingeniero, E., En Electrónica, M., Xavier, J., Guerrero, S., Ingeniero, E., & Reservados, D. (s/f). Edu.ec. Recuperado el 29 de junio de 2023, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21317/1/UPS-CT009373.pdf>
- [49] Castro Martinez, Jesús & Domínguez, Manuel & Villaseñor, Rafael. (2019). Estudio e implementación del modelado y control de un aerogenerador en Matlab Simulink.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

- [50] Loja.P.(2021). Sistema de emulación eólica para validar parámetros característicos de sistemas distribuidos. Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado el 29 de junio de 2023, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20059/1/UPS-CT009017.pdf>
- [51] Guasumba.J, Vasco.G, Garay.V, Simbaña.M(2021). Estimación y recuperación del sistema de almacenamiento de energía electroquímica aplicado en vehículos eléctricos.
[https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111036.\(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121003269\)](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111036.(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121003269))
- [52] Watt, 605-625. (s/f). Tiger Neo N-type 78HL4-BDV. Jinkosolar.eu. Recuperado el 17 de junio de 2024, de <https://jinkosolar.eu/wp-content/uploads/JKM605-625N-78HL4-BDV-F3-EN-1.pdf>



Anexos

Anexo 1: Especificaciones Técnicas de Panel Fotovoltaico

ESPECIFICACIONES											
Tipo de módulo	JKM595N-78HL4		JKM600N-78HL4		JKM605N-78HL4		JKM610N-78HL4		JKM615N-78HL4		
	JKM595N-78HL4-V	JKM600N-78HL4-V	JKM605N-78HL4-V	JKM610N-78HL4-V	JKM615N-78HL4-V	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Potencia nominal (Pmax)	595Wp	447Wp	600Wp	451Wp	605Wp	455Wp	610Wp	459Wp	615Wp	462Wp	
Tensión de máxima potencia-Vmpp	45.29V	41.93V	45.39V	42.05V	45.49V	42.16V	45.59V	42.28V	45.69V	42.39V	
Corriente de máxima potencia-Impp (A)	13.14A	10.67A	13.22A	10.73A	13.30A	10.79A	13.38A	10.85A	13.46A	10.91A	
Tensión en circuito abierto-Voc (V)	54.80V	52.05V	54.95V	52.20V	55.10V	52.34V	55.25V	52.48V	55.40V	52.62V	
Corriente de cortocircuito-Isc (A)	13.90A	11.22A	13.97A	11.28A	14.04A	11.34A	14.11A	11.39A	14.18A	11.45A	
Eficiencia del módulo (%)	21.29%		21.46%		21.64%		21.82%		22.00%		
Temperatura de operación (°C)	-40°C~+85°C										
Tensión máxima del sistema	1000/1500VDC (IEC)										
Valor máximo del fusible en serie	30A										
Tolerancia de potencia nominal (%)	0~+3%										
Coefficiente de temperatura de Pmax	-0.30%/°C										
Coefficiente de temperatura de Voc	-0.25%/°C										
Coefficiente de temperatura de Isc	0.046%/°C										
Temperatura de operación nominal de la célula	45±2°C										



Anexo 2: Especificaciones Técnicas Baterías de Ion-Litio



PRODUCT DESCRIPTION

PRODUCT NAME	<u>LiFePO4 Pack</u>
NOMINAL VOLTAGE	<u>48V(customized)</u>
RATED CAPACITY	<u>600AH(customized)</u>
CHARGE CURRENT	<u>300A 0.5C(max)</u>
DISCHARGE CURRENT	<u>600A 1C(max)</u>
CHARGE VOLTAGE	<u>54.75V(customized)</u>
DISCHARGE VOLTAGE	<u>37.5V(customized)</u>
PRODUCT DIMENSION	<u>L600*W600*H1600(MM)</u> <u>(customized)</u>
WEIGHT	<u>365KG</u>
CASE MATERIAL	<u>19Inch Rack</u>
COMMUNICATION PROTOCOL	<u>RS485,CAN(customized)</u>
APPLICATION	<u>Communication Base Station</u> <u>Household Energy Storage</u>



Anexo 3: Especificaciones Técnicas Electrolizador PEM

Flujo de salida	2 Nm ³ /h
Flujo de salida de oxígeno	1 Nm ³ /h
Presión de salida	3 MPa
Clasificación de potencia del electrolizador	10 KW
Voltaje nominal	100 VDC
Corriente nominal	100 ADC
Corriente de funcionamiento	0-110 ADC
Sala de trabajo electrolizador	50
Área activa del electrodo de membrana	100 (10,1*10,1) cm ²
Membrana electrodo corriente denso	1,0/cm ²
Marco de dimensiones del electrolizador	163*163mm
Dimensiones exteriores del electrolizador	254*170*426mm
Presión de salida de hidrógeno	30 bar
Presión de salida de oxígeno	Normal
Presión de entrada	Máximo 2 bar
Requisitos de calidad de la entrada de agua	ASTMD1193 tipo (<0 1uS/cm> 10MΩ-cm)
Consumo de agua	1.7L/h
Temperatura de trabajo	45 °C ~ 65 °C
Consumo de energía	4,78
Valores de eficiencia energética	74%



Anexo 4: Calculo LCOE

Anexo 4.1: Costos para calculo LCOE Caso Base

Tabla 4.1: Precio equipos, Potencia y cantidad para Generación solar fotovoltaica caso base.

	Precio [USD/Wp]	Potencia [Wp]	Cantidad por zona [U]
Cantidad de Paneles	0,21	600	300
Soportes para paneles	0,05	600	300
Inversores	0,10	15.000	13
Instalación Mecánica y Eléctrica	0,15	600	300
Cableado	0,03	600	300
Costo Ingeniería	0,03	600	300
Cierre Perimetral	0,09	600	300

Tabla 4.2: Precio equipos, Potencia y cantidad para Generación eólica caso base.

	Precio [USD/Wp]	Potencia [Wp]	Cantidad por zona [U]
Aerogenerador	0,37	15.000	12
Obras Civiles	0,05	15.000	12
Inversores	0,10	15.000	12
Instalación Mecánica y Eléctrica	0,15	15.000	12
Cableado DC, AC y MT	0,03	15.000	12
Costo Ingeniería	0,03	15.000	12
Cierre Perimetral	0,09	15.000	12



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Tabla 4.3: Precio equipos, Energía y cantidad para Almacenamiento por baterías caso base para cada zona.

	Precio [USD/Wh]	Potencia [Wh]	Zona Norte [U]	Zona Centro- Sur [U]	Zona Austral [U]
Baterías	0,12	30.000	213	66	155
Obras Civiles	0,01	30.000	213	66	155
Instalación Mecánica y Eléctrica	0,02	30.000	213	66	155
Cableado DC, AC y MT	0,02	30.000	213	66	155
Costo Ingeniería	0,01	30.000	213	66	155

Tabla 4.4: Precio equipos y cantidad para grupo electrógeno caso base para cada zona.

	Precio [USD]	Cantidad por zona
Grupo Electrogeno 150 KVA	25.556	1
Instalación Mecánica y Eléctrica	1.278	1
Cableado DC, AC y MT	1.278	1



Anexo 4.2: Costos para calculo LCOE Caso Optimizado-Corregido

Tabla 4.5: Precio equipos, Potencia y cantidad para Generación solar fotovoltaica caso optimizado-correctido por zona.

	Precio [USD/Wp]	Potencia [Wp]	Zona Norte [U]	Zona Centro- Sur [U]	Zona Austral [U]
Cantidad de Paneles	0,21	600	195	300	84
Soportes para paneles	0,05	600	195	300	84
Inversores	0,10	15.000	8	300	84
Instalación Mecánica y Eléctrica	0,15	600	195	300	84
Cableado	0,03	600	195	300	84
Costo Ingeniería	0,03	600	195	300	84
Cierre Perimetral	0,09	600	195	300	84

Tabla 4.7: Precio equipos, Potencia y cantidad para Generación eólica caso base.

	Precio [USD/Wp]	Potencia [Wp]	Zona Norte [U]	Zona Centro- Sur [U]	Zona Austral [U]
Aerogenerador	0,37	15.000	12	12	17
Obras Civiles	0,05	15.000	12	12	17
Inversores	0,10	15.000	12	12	17
Instalación Mecánica y Eléctrica	0,15	15.000	12	12	17
Cableado DC, AC y MT	0,03	15.000	12	12	17
Costo Ingeniería	0,03	15.000	12	12	17
Cierre Perimetral	0,09	15.000	12	12	17



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

Tabla 4.8: Precio equipos, Energía y cantidad para Almacenamiento por baterías caso base para cada zona.

	Precio [USD/Wh]	Potencia [Wh]	Zona Norte	Zona Centro -Sur	Zona Austral
Baterías	0,12	30.000	213	66	155
Obras Civiles	0,01	30.000	213	66	155
Instalación Mecánica y Eléctrica	0,02	30.000	213	66	155
Cableado DC, AC y MT	0,02	30.000	213	66	155
Costo Ingeniería	0,01	30.000	213	66	155

Tabla 4.9: Precio equipos y cantidad para grupo electrógeno caso base para cada zona.

	Precio [USD]	Cantidad por zona
Grupo Electrogeno 150 KVA	25.556	1
Instalación Mecánica y Eléctrica	1.278	1
Cableado DC, AC y MT	1.278	1



Anexo 4.3: CAPEX

Tabla 4.10: CAPEX caso base para cada zona.

	Zona Norte Caso Base	Zona Norte Opt-Corr	Zona Centro- Sur Caso Base	Zona Norte Opt- Corr	Zona Austral	
GENERACIÓN PV	USD 119.400	USD 76.935	USD 119.400	USD 119.400	USD 119.400	USD 33.972
GENERACIÓN EÓLICA	USD 146.100	USD 146.100	USD 146.100	USD 146.100	USD 146.100	USD 206.975
ALMACENAMIENTO	USD 1.096.950	USD 1.096.950	USD 339.900	USD 339.900	USD 798.250	USD 798.250
MODULO RESPALDO	USD 28.111	USD 28.111	USD 28.111	USD 28.111	USD 28.111	USD 28.111
CAPEX TOTAL	USD 1.390.561	USD 1.348.096	USD 633.511	USD 633.511	USD 1.091.861	USD 1.067.308

Los OPEX corresponden al 2% del costo de inversión total.



Anexo 5: Calculo LCOH

Tabla 5.1: CAPEX Generación de hidrógeno caso base.

	Cantidad	Precio	Costo
Electrolizador	3	USD 43.330	USD 129.990
Purificador de agua	1	USD 10.000	USD 10.000
Sistemas anexos	1	USD 20.000	USD 20.000
Almacenamiento	1	USD 44.444	USD 44.444
Costo Ingeniería	1	USD 10.000	USD 10.000
Obras Civiles	1	USD 15.000	USD 15.000
		Total	USD 214.434

Tabla 5.2: CAPEX Generación de hidrógeno caso optimizado-correcto.

	Cantidad	Precio	Zona Norte	Zona Centro-Sur	Zona Austral
Electrolizador	6/7/9	USD 43.330	USD 259.980	USD 303.310	USD 389.970
Purificador de agua	1	USD 10.000	USD 10.000	USD 10.000	USD 10.000
Sistemas anexos	1	USD 20.000	USD 20.000	USD 20.000	USD 20.000
Almacenamiento	1	USD 44.444	USD 44.444	USD 44.444	USD 44.444
Costo Ingeniería	1	USD 10.000	USD 10.000	USD 10.000	USD 10.000
Obras Civiles	1	USD 15.000	USD 15.000	USD 15.000	USD 15.000
		Total	USD 344.424	USD 387.754	USD 474.414

Los OPEX fueron calculados a partir del 2% del costo total de inversión.