



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA
GRANJA SOLAR PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A
LA ISLA MOCHA, UTILIZANDO HIDRÓGENO VERDE COMO FUENTE
DE ALMACENAMIENTO”

AUTORES

BIANCA PAULINA GODOY HERNANDEZ
MATIAS ALFONSO FIGUEROA DURAN

TRABAJO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN AUTOMATIZACIÓN

CONCEPCIÓN – CHILE



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



“EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA
GRANJA SOLAR PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A
LA ISLA MOCHA, UTILIZANDO HIDRÓGENO VERDE COMO FUENTE
DE ALMACENAMIENTO”

AUTORES

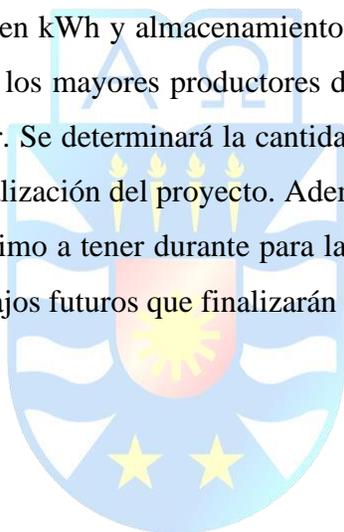
BIANCA PAULINA GODOY HERNANDEZ
MATIAS ALFONSO FIGUEROA DURAN

DOCENTE GUIA: JAIME ROHTEN CARRASCO

DOCENTE ADJUNTO: VLADIMIR ESPARZA HENRÍQUEZ

RESUMEN

En este trabajo se realiza la revisión de la parte teórica necesaria para la “Evaluación técnica de la implementación de una granja solar para el suministro de energía eléctrica a la Isla Mocha, utilizando hidrógeno verde como fuente de almacenamiento”, como primera etapa se realizará la revisión del estado del arte de la Energía Solar y el Hidrógeno como fuente de almacenamiento. Se explicarán las condiciones y especificaciones claves de la isla, tales como su clima, posicionamiento geográfico, aspectos que pueden afectar al proyecto fotovoltaico, además de la cantidad de recurso solar que puede ser explotada por esta. Posteriormente se realizará el estudio del consumo energético de la radiación solar de la isla para determinar su producción en kWh y almacenamiento correspondiente, recordar que el país se posiciona como uno de los mayores productores de Energía Solar gracias a su rica disponibilidad del recurso solar. Se determinará la cantidad de paneles a usar, inversores y pilas de combustible para la realización del proyecto. Además, se realizará un breve estudio económico de presupuesto mínimo a tener durante para la instalación, para posteriormente realizar las conclusiones y trabajos futuros que finalizarán este trabajo de título.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi mamá, ya que gracias a ella he logrado ser la persona que soy hoy en día, gracias a su gran apoyo y todo lo que ha hecho por mí, y enseñarme que nunca hay que darse por vencida y que soy capaz de mucho y más.

A mi papá y a Anita que me han brindado todo su apoyo y cariño estos años de estudio fuera de mi hogar.

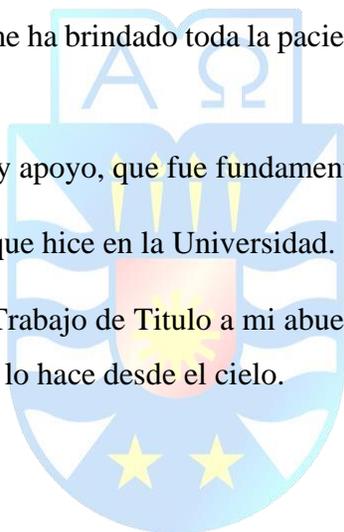
A mis tíos y a mi primita por siempre estar para lo que necesite y su apoyo a pesar de la distancia.

A mi mejor amiga Carito, que me ha brindado toda la paciencia y su cariño a lo largo de toda esta etapa.

A Sebastián por todo su cariño y apoyo, que fue fundamental en este proceso.

A mis amigos incondicionales que hice en la Universidad.

Finalmente, quiero dedicar mi Trabajo de Título a mi abuelita, que me apoyó por gran parte de este proceso, pero que ahora lo hace desde el cielo.



Bianca Godoy

Por otro lado, Agradecer primeramente a mis padres, Moisés e Ivonne, sin ellos no sería la persona que sería hoy en día, agradezco cada pizca de cariño, dedicación y enseñanza que me han brindado, junto a su apoyo incondicional, los mejores padres que la vida me pudo dar.

Agradecer a mi abuelo Lorenzo que ha sido un abuelo multiplicado por cuatro, un padre más en mi vida.

Agradecer a mis tíos, que son mis segundos padres, y siempre han estado pendientes y preocupados por mí.

Agradecer a mi hermana Nayaret, mi primo Golo y mi amigo Brayán, que me han aguantado en mis peores momentos, incluso en situaciones de frustración y pena. Siempre apoyándome y confiando en mí, brindándome su apoyo y buenas vibras en todo momento.

También agradezco a mi novia Catalina, que ha estado presente en todo este proceso final, difícil y relevante, con sus detalles, cariño, entrega preocupación y apoyo. Finalmente, agradecer al profesor Jaime Rohten, por la confianza puesta en mí, su entrega como profesor, destacando su vocación

Finalmente dedico este trabajo de título a mi hermana mayor Valeri, que me apoyó siempre, se preocupó de mí en todo momento, más que una hermana fue otra madre y por cosas del destino, ya no está presente terrenalmente. Te amo por toda la vida hermana.

Matías Figueroa Durán

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1. INTRODUCCION	21
1.1 Introducción	21
1.2 Problemática actual de la Isla Mocha	21
1.3 Medio ambiente y contaminación actual de la Isla.....	22
1.4 Legislación y Normativas para la instalación fotovoltaica y almacenamiento de Hidrógeno	23
1.5 Objetivos	24
1.5.1 Objetivos Generales.....	24
1.5.2 Objetivos Específicos	24
1.6 Revisión Bibliográfica	25
1.7 Hipótesis	25
CAPITULO 2. ENERGÍAS RENOVABLES	27
2.1 Introducción	27
2.2 Energía Solar Fotovoltaica	29
2.2.1 Energía solar en Chile.....	31
2.3 Paneles Solares Fotovoltaicos.....	33
2.3.1 Clasificación Paneles Fotovoltaicos	34
2.4 Células Fotovoltaicas	35
2.5 Generadores Fotovoltaicos	37
2.6 Inversores.....	38
2.7 Instalaciones Fotovoltaicas	38
2.7.1 Instalaciones aisladas a la red	38
2.7.2 Instalaciones conectadas a la red	38

2.7.3 Instalaciones Híbridas.....	39
2.8 Conclusiones.....	39
CAPITULO 3. HIDRÓGENO VERDE	40
3.1 Introducción.....	40
3.1.2 Tipos de Hidrógeno	41
3.2 El Hidrógeno Verde.....	42
3.2.2 Implementación del H ₂ V.....	45
3.2.3 Ventajas en la utilización del H ₂ V	46
3.2.4 Impacto	47
3.2.5 Almacenamiento del Hidrógeno Verde.....	49
3.3 Electrólisis	58
3.3.1 Tipos de Electrólisis	60
3.3.2 Eficiencia de electrolizadores	63
3.4 El Hidrógeno verde en Chile	64
3.4.1 ¿Por qué ahora?.....	69
3.4.2 Aplicaciones	71
3.5 Celdas de combustible	72
3.5.1 Introducción.....	73
3.5.2 Funcionamiento de las celdas de combustible.....	75
3.5.3 Tipos de Celdas de combustible	76
3.6 Evaluación Planta Productora de Hidrógeno.....	79
3.7 Costos de Producción teóricos.....	81
3.8 Conclusión	82
CAPITULO 4. ISLA MOCHA Y SUS CONDICIONES CLIMATICAS	83
4.1 Introducción.....	83
4.2 Sistema eléctrico de la Isla	84
4.3 Condiciones climáticas de la Isla.....	84

4.3.2 Problemas de nubosidad de la Isla y como esto afecta en el rendimiento de los paneles solares FV	87
4.4 Propuesta de posicionamiento paneles solares en la isla	88
4.5 Principales oportunidades en la Isla Mocha.	91
4.6 Cálculo total de emisiones de CO2 emitidas por la Isla.....	92
4.7 Conclusiones.....	93
CAPITULO 5. ESTUDIO DEL CONSUMO DE ENERGIA EN KW EN LA ISLA MOCHA Y SU POTENCIAL SOLAR.	94
5.1 Introducción	94
5.2 Evaluación de la cantidad de paneles solares a usar.....	94
5.3 Potencia Producida y eficiencia.....	97
5.4 Factor de Perdidas.....	103
5.5 Elección inversor de corriente	103
5.6 Calculo potencia necesaria (kW)	104
5.7 Paneles Fotovoltaicos: Cantidad de horas con y sin funcionamiento por año.....	105
5.8 Recolección de datos para cálculos asociados.....	105
5.9 Evaluación pila de combustible utilizada	106
5.9.1 Pilas de Combustible: Calculo de cantidad a utilizar	110
5.9.2 Pilas de Combustible: Voltaje Generado	110
5.9.3 Pilas de Combustible: Cantidad de H2 necesaria	111
5.9.4 Pilas de Combustible: Factores de corrección	112
5.9.5 Proyección del Consumo	132
5.9.6 Ejemplificación de consumo Hidrógeno y Diesel	135
5.10 Conclusiones.....	137
CAPITULO 6. EVALUACION ECONOMICA	138
6.1 Introducción	138

6.2 Cotización equipos utilizados en el proyecto	138
6.3 Costo parcial del proyecto	142
6.4 Conclusiones.....	142
CAPITULO 7. CONCLUSIONES	144
7.1 Sumario.....	144
7.2 Conclusiones.....	145
7.3 Trabajos futuros	146
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	147



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.1 “Adiciones de capacidad anual de energía solar fotovoltaica, eólica y otras energías renovables, casos principales y acelerados, 2020-2026”	28
Figura 2.1.2 “Adiciones netas de capacidad de sistemas fotovoltaicos a escala de servicios públicos, caso principal y acelerado, mundo, 2000-2026”	28
Figura 2.2.1 “Mapa de irradiación solar global”	29
Figura 2.2.2 “Componentes de la radiación solar que incide hacia la tierra”	31
Figura 2.3.1 “Paneles solares fotovoltaicos”	33
Figura 2.3.2 “Curva característica Corriente vs Voltaje”	34
Figura 2.3.3 “Curva característica Potencia vs Voltaje”	34
Figura 2.3.4 “Panel solar de concentración”	34
Figura 2.3.5 “Panel solar de teja o baldosa”	35
Figura 2.3.6 “Panel solar bifacial”	35
Figura 2.4.1 “Estructura típica de una célula FV”	36
Figura 2.4.2 “Interpretación del aprovechamiento solar por parte de los paneles FV”	36
Figura 2.4.3 “Celdas solares de silicio”	37
Figura 2.6.1: Generadores para sistemas fotovoltaicos	38
Figura 3.1.1 “14 Tipos de Hidrógeno según su color”	41
Figura 3.2.1 “Gráficas de energía contenida en distintos combustibles 2020”	43
Figura 3.2.2 “Diagrama producción de Hidrógeno por reformado de metano a vapor”	44
Figura 3.2.3 “Representación gráfica de la obtención del Hidrógeno verde”	44

Figura 3.2.4 Implementación “Primera planta de H ₂ v de España. “BenorthH ₂ ”	45
Figura 3.2.5 “Diagrama producción Hidrógeno Verde”	47
Figura 3.2.6 “Tanque de Hidrógeno en satélite espacial”.	47
Figura 3.2.8 “Tanques de Hidrógeno a presión (Quantum) para su almacenamiento”	49
Figura 3.2.9 “Microesferas de vidrio para almacenaje de Hidrógeno”.	50
Figura 3.2.10 “Esquema de tanque Criogénico de almacenamiento de Hidrógeno para la industria aeronáutica”	51
Figura 3.2.11 “Tipos de tanques para almacenamiento de Hidrógeno”	51
Figura 3.2.12 “Nanofibra o nanotubo de carbono”	53
Figura 3.2.13 “Hidruros metálicos recargables para el almacenamiento de H ₂ ”	54
Figura 3.2.14 “Diagrama aplicaciones y distribución del H ₂ V”	54
Figura 3.2.15 “Hidrógeno almacenado en containers, siendo transportado por ferrocarriles”	55
Figura 3.2.16 “Camión “tube tráiler” vertical, transportador de Hidrógeno comprimido” ..	56
Figura 3.2.17 “Sistema de transporte de Hidrógeno por gaseoductos”.	56
Figura 3.2.18 “Barco “Suiso Frontier”, primer buque comercial del mundo para el transporte de Hidrógeno líquido”	57
Figura 3.3.1 “Proceso químico de Electrolisis”	58
Figura 3.3.2 “Diagrama electrolito o electrolizador”.	58
Figura 3.3.3 “Esquema oxidación y reducción”	59
Figura 3.3.4 “Diagrama funcionamiento electrólisis alcalina”	60

Figura 3.3.5 “Placas de combustible del tipo PEM”	61
Figura 3.3.6 “Esquema simplificado de celdas de electrólisis PEM”.....	61
Figura 3.3.7 “Diagrama funcionamiento electrólisis de estado Sólido”.....	62
Figura 3.4.2 “Gráfica de costos nivelados de Hidrógeno verde en Chile (USD/kgH ₂)”	66
Figura 3.4.3 “Gráfica de crecimiento con respecto al mercado de Hidrógeno verde y derivados En Chile”.....	66
Figura 3.4.4 “Gráfica de la demanda global del Hidrógeno (PWh)”	67
Figura 3.4.5 “Calentamiento Global respecto años 1960-2100”	70
Figura 3.4.6 “Consumo energético aproximado por cada 100 km en el área vehicular”	71
Figura 3.5.1 “Pila de combustible de metanol directo”	73
Figura 3.5.2 “Esquema de una pila o celda de combustible del tipo PEM.”	74
Figura 3.5.3 “Esquema del apilamiento de pilas de combustible”	74
Figura 3.5.4 “Esquema simplificado del funcionamiento de una pila de combustible”.....	75
Figura 3.5.5 “Transporte, particularmente de maquinaria pesada, utilizando módulos de celdas de combustible, El futuro del transporte”	78
Figura 3.5.6 “Notebook Toshiba, utilizando pilas de combustible, anunciado para su próxima venta el año 2023”.....	78
Figura 3.5.7 “Celda de combustible de ácido fosfórico (Genera 200kW de electricidad y 200kW de energía térmica)”	79
Figura 3.6.1 “Diagrama de áreas y funcionamiento de una planta generadora de H ₂ ”	80
Figura 4.1.1 “Mapa ubicación Isla Mocha”	83

Figura 4.3.1 “Mapa de calor Temperatura- Hora-Mes, Isla Mocha”	85
Figura 4.3.2 “Exploración recurso solar y datos meteorológicos”	85
Figura 4.3.3 “Radiación Directa y Difusa”	86
Figura 4.3.4 “Variación anual de la radiación”	86
Figura 4.3.5 “Mapa frecuencia de nubes presentes durante mes/hora”	87
Figura 4.4.1 “Posicionamiento, opción 1”	89
Figura 4.4.2 “Posicionamiento, opción 2”	89
Figura 4.4.3 “Posicionamiento, opción 3”	89
Figura 4.4.4 “Mapa Isla Mocha para posicionamiento”	90
Figura 5.2.1 “Diseño panel solar DHM-72L9”	94
Figura 5.3.1 “Gráfica cantidad de Radiación anual por mes, año 2014”	97
Figura 5.3.2 “Gráfica de datos Radiación 2014”	98
Figura 5.3.3 “Gráfica cantidad de Radiación anual por mes, año 2015”	98
Figura 5.3.4 “Gráfica de datos Radiación 2014”	99
Figura 5.3.5 “Gráfica cantidad de Radiación anual por mes, año 2016”	99
Figura 5.3.6 “Gráfica de datos Radiación 2014”	100
Figura 5.3.7 “Gráfica de comparación, cantidad de Radiación mensual a tres años”	100
Figura 5.5.1 “Inversor NP5000-42”	104
Figura 5.9.1 “Pila de combustible de H2 a utilizar “FCS-C5000”	107
Figura 5.9.2 “Diagrama de configuración del sistema”	108

Figura 5.9.3 “Gráfica Comportamiento en función del voltaje con respecto a la corriente”	109
Figura 5.9.4 “Gráfica Caudal H2 (ml) con respecto a la potencia”	109
Figura 5.9.5 “Gráfica Comportamiento de la pila con respecto a la potencia en función a la corriente”	110
Figura 5.9.6 “Gráfico Promedio mensual (presión atmosférica [hPa] / Meses) de la isla en el 2021”	112
Figura 5.9.7 “Gráfico Promedio mensual (presión atmosférica [hPa] / Meses) de la isla en lo que va del 2022 (Desde Enero hasta Julio)”.....	112
Figura 5.9.8 “Gráfico Promedio mensual (Temperatura [°C] / Meses del año) de la isla en el 2021”	113
Figura 5.9.9 “Gráfico Promedio mensual (Temperatura [°C] / Meses del año) de la isla en lo que va del 2022”.....	113
Figura 5.9.10 “Gráfico Promedio mensual (Humedad relativa del aire [%] / Meses del año) de la isla en el 2021”.....	113
Figura 5.9.11 “Gráfico Promedio mensual (Humedad relativa del aire [%] / Meses) de la isla en 2022”	114
Figura 5.9.12 “Factores de corrección mensuales de las variables temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en función a los promedios mensuales de la isla (Basándose en las condiciones ambientales de los últimos 12 meses). (Julio 2021 - Julio 2022)”	117
Figura 5.9.13 “Porcentaje factor de corrección total de cada mes”	118
Figura 5.9.14 “Cantidad de horas continuas y totales mensuales sin funcionamiento de los paneles FV”	124
Figura 5.9.15 “Gráfica Proyección 2017-2040 a una tasa del 2% anual”	133

Figura 5.9.16 “Gráfica Proyección 2017-2040 a una tasa del 5% anual” 134

Figura 5.9.17 “Comparación cantidad en kilos de Hidrógeno y Diesel”..... 136



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.3.1 “Comparativa entre electrolisis PEM y Alcalina”	63
Tabla 3.4.1 “Estimaciones mencionadas dentro de la estrategia nacional del Hidrógeno verde”	68
Tabla 3.4.2 “Metas en la estrategia nacional del Hidrógeno verde”	68
Tabla 3.4.3: “Comparativa del H2 y otros combustibles, costos y eficiencia”	69
Tabla 3.5.1 “Principales Tipos de celdas de combustible y sus diferencias”	76
Tabla 3.5.2 “Tipos de pilas de combustible y sus características técnicas”	77
Tabla 3.7.1 “Tabla comparativa costo actual de los diferentes combustibles”	81
Tabla 4.2.1 “Mapa ubicación Isla Mocha”	84
Tabla 4.4.1 “Potencia de las 10 granjas solares más grandes de Chile”	91
Tabla 5.2.1 “Especificaciones técnicas panel solar DHM-72L9”	95
Tabla 5.2.2 “Características panel solar DHM-72L9”	95
Tabla 5.2.3 “Certificación panel solar DHM-72L9”	95
Tabla 5.3.1 “Radiación total 3 años en kWh/m ² ”	101
Tabla 5.3.2 “Porcentaje de crecimiento”	101
Tabla 5.3.3 “Radiación máxima y mínima promedio anual”	102
Tabla 5.3.4 “Radiación máxima y mínima promedio mensual”	102
Tabla 5.3.5 “Datos de Rangos de Temperatura panel solar”	103
Tabla 5.9.1 “Especificaciones técnicas de la celda de combustible FCS-C5000”	108

Tabla 5.9.2 “Promedio mensual temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en función de los meses y sus respectivas conversiones de unidades de medida. (Basándose en las condiciones ambientales de los últimos 12 meses en la Isla Mocha). (Julio 2021 - Julio 2022)”	114
Tabla 5.9.3 “Formulario Factores de corrección”	116
Tabla 5.9.4” Factores de corrección mensuales de las variables temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en función a los promedios mensuales de la isla (Basándose en las condiciones ambientales de los últimos 12 meses). (Julio 2021 - Julio 2022)”	116
Tabla 5.9.5 “Factor de corrección total de cada mes y factor total promedio”	118
Tabla 5.9.6 “Factor de corrección total máximo y mínimo”	119
Tabla 5.9.7 “Factor de corrección promedio máx., mín., prom.”	119
Tabla 5.9.8 “Consumo kg de H ₂ ”	122
Tabla 5.9.9 “Cantidad de horas y días sin funcionamiento de los paneles FV”	124
Tabla 5.9.10 “Consumo en kWh para las horas sin funcionamiento de los paneles FV”	127
Tabla 5.9.11 “Consumo en kWh total”	127
Tabla 5.9.12 “Cantidad de paneles a utilizar por cantidad de consumo en kWh”	128
Tabla 5.9.13 “Cantidad de inversores a utilizar según la cantidad de paneles para el consumo parcial y total”	129
Tabla 5.9.14 “Promedios Factor de corrección”	130
Tabla 5.9.15 “Promedios Factor de corrección”	132
Tabla 5.9.16 “Proyección 2017-2040, Tasa del 2% anual”	132
Tabla 5.9.17 “Proyección 2017-2040, Tasa del 5% anual”	133

Tabla 6.2.1 “Cotización panel solar para consumo diario/kWh”	138
Tabla 6.2.2 “Cotización panel solar para consumo promedio mensual/kWh”	138
Tabla 6.2.3 “Cotización panel solar para consumo anual/kWh”	139
Tabla 6.2.4 “Cotización inversor para consumo diario/kWh”	139
Tabla 6.2.5 “Cotización inversor para consumo promedio mensual/kWh”	140
Tabla 6.2.6 “Cotización inversor para consumo anual/kWh”	140
Tabla 6.2.7 “Pila de combustible”	140
Tabla 6.2.8 “Tanque de almacenamiento de Hidrógeno”	141
Tabla 6.3.1 “Costos parciales, Perfil Mensual de la isla”	142
Tabla 6.3.2 “Costos parciales, Perfil Diario de la isla”	142
Tabla A.0.1 “Registro Radiación Global 2016, en W/m ² ”	153
Tabla A.0.2 “Registro Radiación Global 2016, en kWh/m ² ”	153
Tabla A.0.3 “Registro Radiación Global 2015, en W/m ² ”	153
Tabla A.0.4 “Registro Radiación Global 2015, en kWh/m ² ”	154
Tabla A.0.5 “Registro Radiación Global 2014, en W/m ² ”	154
Tabla A.0.6 “Registro Radiación Global 2014, en kWh/m ² ”	155

ABREVIACIONES

ERNC: Energías Renovables No Convencionales

FV: Fotovoltaico

LCOH: Costo Nivelado del Hidrógeno

CONAF: Corporación Nacional Forestal

ENAP: Empresa Nacional del Petróleo

SNASPE: Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado

PIB: Producto Interno Bruto

H2V: Hidrogeno Verde

CSP: Concentración Solar de Potencia

SEN: Servicio Eléctrico Nacional

CNE: Comisión Nacional de Energía

CO₂: dióxido de carbono

CO: Monóxido de carbono

H₂: Hidrogeno

O₂: Oxigeno

USD: dólar estadounidense

H₂O: Molécula de agua

KOH: Hidróxido de Potasio

EA: Electrolisis Alcalina

PEM: Proton Exchange Membrane

NDC: Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado

FTEMP: Factor corrección Temperatura



FP: Factor corrección Presión atmosférica

FHR: Factor corrección Humedad relativa

FT: Factor de corrección Total

AIE: Asociación de la Industria Eléctrica Electrónica

REDOX: Reacción Oxidación-Reducción



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Actualmente el uso de combustibles fósiles en la industria energética ha traído una gran problemática debido a ser el mayor causante de los gases de efecto invernadero, aportando al cambio climático y a sus graves consecuencias con el medio ambiente. En el 2020 hubo un crecimiento significativo del uso de energías renovables, con respecto a otros años, tomando posición el uso de energía solar. Dado esto y otros aspectos es que hubo un descenso del 6% de las emisiones de carbono, la problemática en ello es que también se debe a la actual pandemia, por lo que cuando el mundo se recupere, las emisiones de carbono subirán. Es por esta y muchas razones que se ha buscado una forma más limpia de producción de energía y esta es mediante las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), como la energía solar fotovoltaica, en la cual nuestro país se encuentra dentro de un lugar privilegiado dada su geografía y clima, es por esto además que se espera para los próximos años que Chile sea exportador de estas energías limpias [1].

Lamentablemente la energía solar fotovoltaica tiene un inconveniente, ya que las granjas solares solo funcionan durante el día, es por esto por lo que la solución es utilizar H2V para suplirlo por la energía proveniente del sol cuando esta no pudiera cumplir su función, esta se obtiene mediante un proceso llamado electrólisis y se genera mediante fuentes renovables de energía para su almacenamiento [2].

Se busca usar este tipo de energías renovables para su implementación en la Isla Mocha, ya que al ser una fuente inagotable de energía ofrece bajar los índices de contaminación, eliminar la dependencia energética desde el continente, además de una reducción de costos asociados a la energía eléctrica sustentada por el Diesel en la Isla y transporte de ella.

1.2 Problemática actual de la Isla Mocha

La Isla Mocha se ubica en la región del Biobío, Provincia de Arauco y es dependiente de la Municipalidad de Lebu. Esta cuenta con un área de 48km^2 , siendo un 45% parte de la Reserva Nacional Isla Mocha perteneciente a CONAF, con una cantidad de 700 personas que habitan la zona, siendo su principal actividad productiva la pesca artesanal, agricultura y el turismo [3]. Esta Isla cuenta con un sistema eléctrico aislado, por lo que cuenta con autonomía en materia de generación, transporte y distribución de energía eléctrica [4]. El

sistema eléctrico cuenta con 220 kW de generación para las 257 viviendas declaradas al año 2017. En 2014 se autorizó mediante SEC el proyecto “Ingeniería Sistema Interconexión Isla Mocha” realizada por la Empresa Nacional de Petróleo ENAP, que consistió en la instalación de una estación para el uso de generadores de gas natural manteniéndolo como la principal fuente de generación eléctrica y así disponer de gas natural en forma continua, siendo el SCANIA/2012 de 250 kVA, y el generador Diesel que serviría de respaldo para eventuales contingencias MWM/2010 de 90 kVA. En 2021 la Isla está haciendo uso de Diesel para el uso de suministro energético proporcionado por la Comercializadora de Combustibles Ingeniería DYM, luego de que tras una deuda de 800 millones por parte de la isla y una amenaza de corte de suministro de combustible se llegara a acuerdos entre la empresa y el Gobierno Regional del Biobío para así seguir generando electricidad para la isla [5].

1.3 Medio ambiente y contaminación actual de la Isla

La Isla Mocha pertenece a una de las áreas protegidas pertenecientes al SNASPE, debido a la importancia de su ecosistema y además siendo el único territorio insular de la Región del Biobío perteneciente a esta. Tiene dos áreas, la central montañosa cubierta de bosques en la cual se sitúa la Reserva Nacional Isla Mocha y el sector plano donde vive la población, conformada por praderas, matorrales y playas. La contaminación existente en la isla se debe al uso de Diesel para el abastecimiento de energía eléctrica.

Dentro de la reserva se encuentra el ave Fardela Blanca, la cual anida únicamente en la Isla Juan Fernández e Isla Mocha y la cual actualmente se encuentra en peligro de extinción.

El sector habitado de la Isla contiene una gran cantidad de plantas como dunas, bosques de hualve, praderas húmedas, praderas secas, bosques de boldo y matorrales de maqui y chilco, también se encuentran arrecifes y roqueríos e islotes con una gran fauna marina. A pesar de que la Isla se encuentre protegida se han evidenciado problemas ambientales debido a actividades desarrolladas por la comunidad perteneciente a ella. Según un Informe del año 2018 falta fiscalización ambiental [6].

1.4 Legislación y Normativas para la instalación fotovoltaica y almacenamiento de Hidrógeno

- LEY 20698 que propicia la ampliación de la matriz energética mediante fuentes renovables no convencionales.

La ley establece además que el Ministerio de Energía deberá efectuar licitaciones públicas para la provisión de bloques anuales de energía provenientes de medios de generación de energía renovable no convencional. La adjudicación se efectuará tomando en consideración los volúmenes de energía ofertada y los precios unitarios asociados a ellos, debiendo adjudicarse las ofertas con menores precios [7].

- Norma Chilena NCh3649.

Se encarga de determinar el procedimiento para la medición de la eficiencia general de los inversores fotovoltaicos conectados a la red, evaluando separadamente tanto la eficiencia de la conversión de energía como la de su rastreador del punto máximo de potencia de los módulos fotovoltaicos [8].

- Ley 20.571 (Net Billing).

La Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC) exige como requisito mínimo de aceptación la norma internacional **IEC 61215**. Los módulos fotovoltaicos que pasen este requisito mínimo podrán inyectar legalmente a la red eléctrica nacional [8].

- Normas chilenas NCh-IEC 61215-1 y NCh-IEC 61215-2

Definen y detallan los procedimientos y ensayos que contienen estos requisitos mínimos exigidos por la SEC en idioma español. La aplicación directa de estas normas puede verse en la certificación de módulos fotovoltaicos y, a su vez, para que los usuarios puedan comprender las condiciones límites que pueden soportar los módulos, tales como cargas mecánicas, ciclos térmicos, robustez de terminales, entre otros [8].

- Normas chilenas NCh-IEC 62446-1 y NCh3650

Estas contienen las especificaciones de los ensayos mínimos para poner en marcha, operar y mantener una planta fotovoltaica. A su vez, enumeran la documentación mínima para llevar

a cabo estas actividades. De esta forma se propone un estándar para definir la calidad mínima en las instalaciones fotovoltaicas [8].

- Norma Chilena NCh-IEC/TS 62548

Describe los requisitos de diseño para sistemas fotovoltaicos, incluyendo cableado de los arreglos en corriente continua, dispositivos de protección eléctrica, disposiciones sobre conmutación y puesta a tierra.

- Norma Chilena NCh-IEC 6209

Determina las características de desempeño de cada uno de estos componentes luego de exponerse a las condiciones ambientales naturales de servicio simuladas para las cuales se prevé su aplicación, de acuerdo con la especificación del fabricante [8].

- Ley N° 19.300

Según lo establecido por el marco legal vigente, la evaluación de impacto ambiental es el procedimiento orientado a determinar si el impacto ambiental de un proyecto o actividad se ajusta a las normas vigentes. Sobre Bases Generales del Medio Ambiente, establece que dicho procedimiento está a cargo del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).

- Ley 20.698

Propicia la ampliación de la matriz energética mediante fuentes renovables no convencionales.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivos Generales

Suministrar de energía eléctrica a la Isla Mocha considerando una combinación entre energía fotovoltaica e Hidrógeno Verde para la independencia energética del continente.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Realizar una comparación entre paneles fotovoltaicos con y sin almacenamiento de energía y la energía diésel.

- Calcular el mejor dimensionamiento y posicionamiento para los paneles fotovoltaicos, basándose en las características climáticas de la Isla.
- Estudiar el consumo diario/semanal/mensual de energía kW en la isla y su potencial solar.
- Evaluación LCOH sensibilizado, para su posterior aprobación e implementación.

1.6 Revisión Bibliográfica

La Revisión bibliográfica realizada para justificar el trabajo realizado se distribuye en las siguientes temáticas: i) Energías Renovables, ii) Hidrógeno Verde, iii) Isla Mocha y sus condiciones climáticas, iv) Estudio del consumo de energía en kW en la isla y su potencial solar, v) Evaluación económica, vi) Conclusiones.

1.7 Hipótesis

La Isla mocha es una zona rural, en donde su población es no menor, comparando con la Isla Santa María, su población llega a consumir más de 250.000 litros de combustible fósil (diésel), altamente contaminante para lograr producir su electricidad, es por esto por lo que su dependencia energética hacia este combustible va en aumento. Considerando así también los gastos económicos de sus habitantes para poder solventar de electricidad y permanecer comunicados también cada vez suben más (cancelando aproximadamente los montos de 140 [\$/kWh] si su consumo mensual es menor a los 100 [kWh], y 315,49 [\$/kWh] si es mayor) [9].

El petróleo, diésel y combustibles fósiles suben sus precios y valores de sus impuestos proporcionalmente con el pasar de los años, debido a que son fuentes energéticas limitadas, que en algún punto llegarán al lapso de acabar sus recursos, estimaciones científicas datan que dentro de los años 2050-2070 este recurso limitado, dejará de existir, alcanzando su extinción. Los costes asociados al transporte del petróleo mediante embarcaciones son otro punto crucial dentro de esta problemática [9].

Recién en el año 2011 la isla recibió un subsidio estatal por parte del gobierno que tenía como objetivo rebajar estos costos, pero la negativa está en que también se limitó su consumo [5]. Por lo que frente a esta problemática se plantea la hipótesis de que la isla podría aprovechar sus recursos energéticos renovables (en este caso paneles solares) para la autogeneración de electricidad, disminuyendo el uso de los combustibles fósiles y así también ayudando en la

gran problemática que se tiene hoy en día mejorando así nuestro ecosistema, disminuyendo en un gran porcentaje la contaminación y así también el calentamiento global.

A partir de esto, el objetivo es evaluar técnicamente la implementación de una granja solar para el suministro de energía eléctrica a la Isla Mocha utilizando el H2V como fuente de almacenamiento.

A su vez como hipótesis se plantea que el consumo energético de la isla irá en paralelo acorde al crecimiento de su población y el desarrollo tecnológico con respecto al tiempo, por lo tanto, el dimensionamiento de la cantidad de paneles solares y su posicionamiento estaría proyectado en cubrir esta necesidad y solventar dicha problemática. Para así entregar a la isla la posibilidad de ser independientes generando su propia energía a partir de los paneles FV, para ello se realizará un estudio económico del proceso.



CAPÍTULO 2. ENERGÍAS RENOVABLES

2.1 Introducción

Las energías renovables son aquellas que provienen de fuentes limpias e inagotables de energía. Estas han estado en aumento en el último tiempo ya que no solo trae beneficios hacia el medio ambiente y la contaminación al disminuir los gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, sino que también al efecto positivo hacia la economía como: capitales alto para la generación de energía renovable, aumento de empleo, ahorro de capital dirigido a combustibles fósiles y gracias a su importante participación en el mercado del carbono así fortaleciendo a los países en desarrollo [10].

Se espera que las adiciones anuales a la capacidad global de electricidad renovable promedien alrededor de 305 GW por año entre 2021 y 2026 en el pronóstico del caso principal de la IEA. Esto implica una aceleración de casi el 60% en comparación con la expansión de las renovables en los últimos cinco años. El apoyo continuo a las políticas en más de 130 países, los ambiciosos objetivos netos cero anunciados por naciones que representan casi el 90% del PIB mundial y la mejora de la competitividad de la energía eólica y solar fotovoltaica están impulsando esta expansión. No obstante, a pesar de este apoyo creciente, las energías renovables enfrentan una variedad de incertidumbres políticas y desafíos de implementación, incluidos los relacionados con el financiamiento, los permisos, la aceptación social y la integración de la red. Los aumentos actuales de los precios de las materias primas han ejercido una presión al alza sobre los costos de inversión, mientras que la disponibilidad de materias primas y el aumento de los precios de la electricidad en algunos mercados plantean desafíos adicionales para los fabricantes de energía eólica y solar fotovoltaica a corto plazo. Sin embargo, se espera que el impacto de los precios volátiles de los productos básicos y del transporte sobre la demanda sea limitado, ya que los altos precios de los combustibles fósiles mejoran aún más la competitividad de la energía eólica y solar fotovoltaica [11].

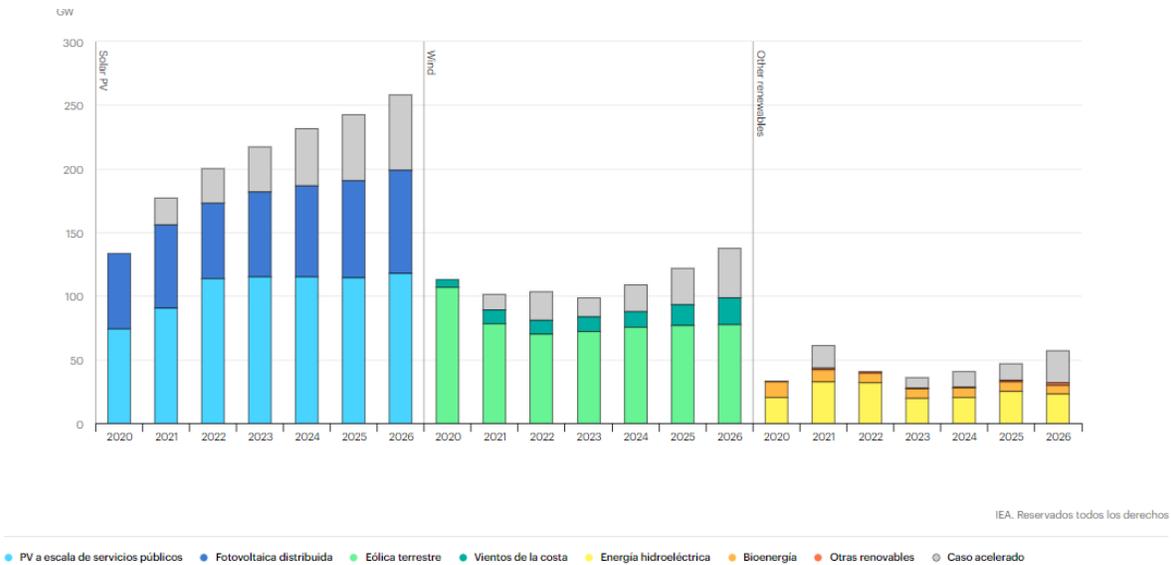


Figura 2.1.1 “Adiciones de capacidad anual de energía solar fotovoltaica, eólica y otras energías renovables, casos principales y acelerados, 2020-2026”

Fuente: IEA.org/report

Actualmente la capacidad de energía renovable, liderada por la fotovoltaica, está estableciendo un nuevo récord en comparación a años anteriores, con un crecimiento de un 3% más que en el año 2020 [12].

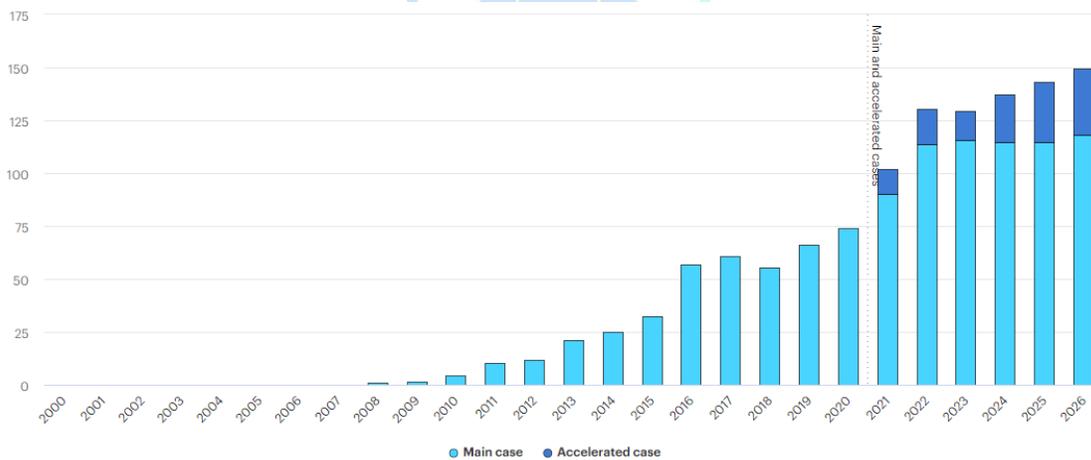


Figura 2.1.2 “Adiciones netas de capacidad de sistemas fotovoltaicos a escala de servicios públicos, caso principal y acelerado, mundo, 2000-2026”

Fuente: IEA.org/report

2.2 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una ERNC que se crea tras la transformación directa de la radiación y la luz procedente del sol en electricidad. Su transformación en electricidad se debe a los paneles fotovoltaicos la cual provoca la incidencia de la radiación solar sobre las células fotovoltaicas. Las ventajas del uso de esta fuente de energía es que es de bajo costo, amigable con el medioambiente, de fácil mantención, y el hecho de que pueda generar energía eléctrica en lugares aislados.

Se ha generado un aumento de la capacidad solar, tanto como en el caso de la energía eólica, logrando una cantidad de hasta 78 GW en el caso de Asia para el año 2020, siendo los más importantes países como China, que lidera la lista con 49 GW, siguiéndola países como Vietnam, Japón, India y Corea. Por otro lado, América también ha tenido un impacto en este tema, siendo el líder USA, el cual agrego 15 GW [13].

La Figura 2.2.1 muestra el mapa de irradiación solar global, donde se observa que gran parte de Chile es privilegiado, ya que posee uno de los índices de irradiación solar más altos del planeta, por lo que nuestro país se encuentra con una gran ventaja en cuanto a implementación de estas fuentes inagotables de energía.

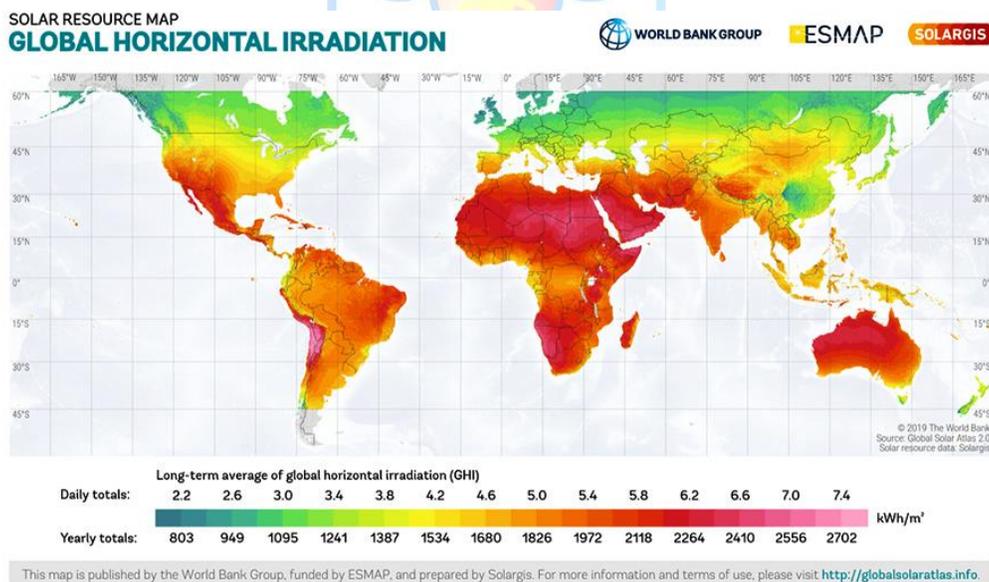


Figura 2.2.1 “Mapa de irradiación solar global”

Fuente: globalsolaratlas.info

Dos conceptos importantes dentro de la energía solar es la irradiancia y la radiación.

Irradiancia: es la relación de la potencia incidente por unidad de superficie de cualquier onda electromagnética con la superficie que la recibe [14], está dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{P_{inc}}{A} [W/m^2] \quad (1)$$

Donde:

E: irradiancia

P_{inc} : potencia incidente

A: área de la superficie la cual será sometida a radiación.

La irradiancia con respecto a la capa externa de la tierra tiene un valor de $1.366 [W/m^2]$ y corresponde a la constante solar, aunque a la tierra llega un valor menor debido a distintos fenómenos que se presentan en la atmósfera [15].

Radiancia: la radiación por su parte es la cantidad de irradiancia recibida en una cantidad de tiempo determinado, por lo que es una unidad de Energía que se expresa de la siguiente manera $kWh/m^2/dia$.

Encontramos tres componentes de la radiación, que respectan de la incidencia de la energía hacia la tierra, estas son directa, difusa y albedo.

Radiación directa: esta es la que incide directamente y no presenta obstáculos durante esta.

Radiación difusa: esta es la que incide de forma no directa y dispersa debido a agentes externos, como las nubosidades o superficies de gran altura.

Radiación albedo: esta proviene desde la superficie terrestre gracias a la reflexión de la radiación que incide sobre ella. Los efectos de esta son casi impredecibles por lo que se desprecia [16].



Figura 2.2.2 “Componentes de la radiación solar que incide hacia la tierra”

Fuente: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/radiacion-solar/>



2.2.1 Energía solar en Chile

El país ha tenido un gran crecimiento con respecto a la implementación de las ERNC, gracias a las políticas energéticas implementadas desde el año 2006, afectando de manera positiva sobre todo en las operaciones de mercado.

En la actualidad las tecnologías más destacadas con respecto a la matriz energética son aquellas que utilizan radiación solar como principal fuente, como lo son la fotovoltaica (FV) y la Concentración Solar de Potencia (CSP), las cuales han llamado la atención hoy en día debido a las ventajas tecnológicas que nos han traído.

Chile posee 3.718 MW de potencia FV y 110 de CSP, entre ellas su principal diferencia es que la primera se basa en el efecto fotoeléctrico, el cual a partir de fotones que inciden sobre los paneles FV se produce una diferencia de potencial a través de la cual se genera corriente eléctrica. Con respecto a la segunda es aquella donde la energía que irradia el sol se refleja en espejos que apuntarán hacia el punto focal, elevando la temperatura de un fluido, en este caso sal fundida, que mediante un efecto de convección transportará el calor para que posteriormente sea transferido hacia otro fluido, agua, debido a esto se producirá un aumento de temperatura convirtiéndose en vapor a presión, así transfiriendo la energía cinética para realizar el movimiento y transformando energía mecánica a eléctrica.

Hoy en día la energía solar representa aproximadamente un 20% de la energía producida por el SEN y se espera un crecimiento prolongado a través de los años, tomando en cuenta que existe una gran cantidad de proyectos calificados y aprobados por las autoridades medioambientales, y además tomando en cuenta que existen otros que no se encuentran operativos por el momento, dado que su construcción aún no está puesta en marcha [17] [18].

Mediante el explorador solar se puede ver, la radiación a la que está expuesto el país. Se encuentra de forma pública y en ella además de medir los recursos solares se pueden hacer cálculos estimados del uso de paneles fotovoltaicos.

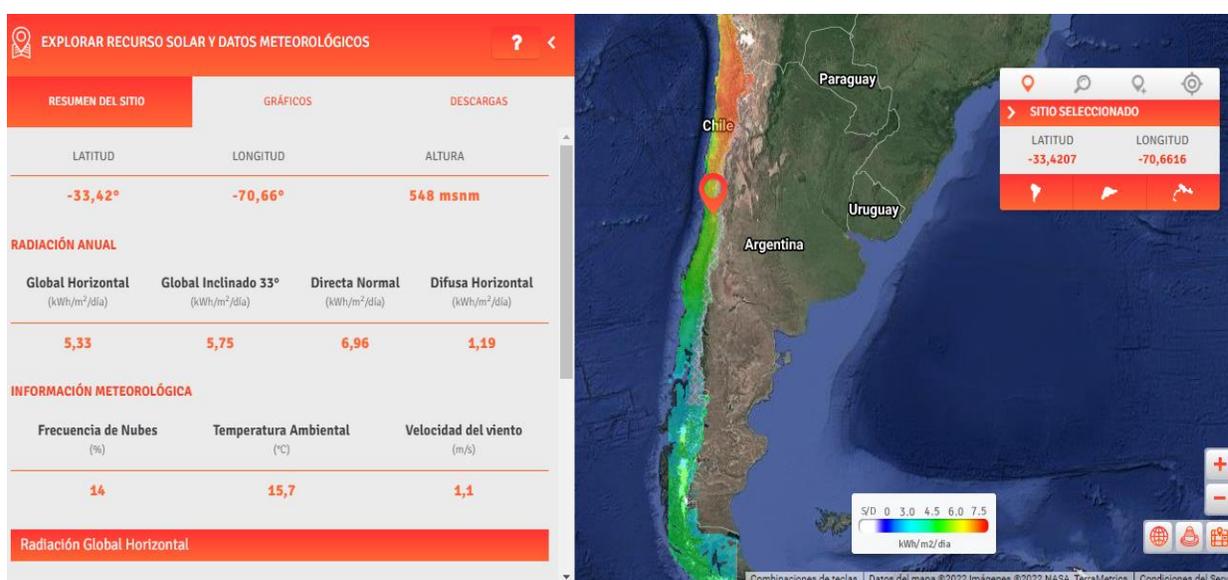


Figura 2.2.3 “Explorador solar Chile”

Fuente: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>

En la actualidad en Chile se están ejecutando varios proyectos con respecto al uso de energía solar como fuente de energía eléctrica, ya que se está frente a uno de los países con capacidad de radiación más altos del mundo. La empresa Mainstream se encuentra ejecutando 5 proyectos solares en nuestro país donde destaca el proyecto de Valle Escondido, el cual pretende tener una granja solar que tendrá 382.000 paneles dentro de 360 hectáreas con una capacidad instalada de 105 MW lo que equivale a un consumo energético para 145.000 hogares.

Para el 2025 se esperaba que un 20% de la energía viniera de energías renovables no convencionales, pero actualmente la cifra supera el 24%. El Reporte Energético de febrero 2021 de la CNE registró 112 proyectos solares fotovoltaicos en construcción (con capacidad de 3.116 MW), de un total de 162 centrales de generación eléctrica [19].

2.3 Paneles Solares Fotovoltaicos

Un panel fotovoltaico es una placa rectangular, la cual está formada por células fotovoltaicas y que se encuentran protegidas por un marco de vidrio y aluminio anodizados. Estos tienen como principal función proteger a las células fotovoltaicas de posibles daños causados por la atmósfera. La vida útil de estas es de aproximadamente 30 años y deben ser sometidas a simples procesos de mantenimiento.



Figura 2.3.1 “Paneles solares fotovoltaicos”

Fuente: <https://autosolar.pe/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-panel-solar-y-como-funciona-guia-definitiva-2021>

La inclinación y posición de un panel solar es muy importante para recibir la mayor cantidad de radiación solar. Por lo general estos son ubicados de forma perpendicular al sol, dado esto se realizan seguimientos para cerciorarse de que cumpla con este estándar.

Los paneles producen una tensión de salida dependiente de la cantidad de celdas solares que los componen. Por su parte la potencia de salida indica la capacidad de generar electricidad en condiciones óptimas de operación [20].

Se pueden visualizar las curvas características de los paneles fotovoltaicos en las siguientes figuras:

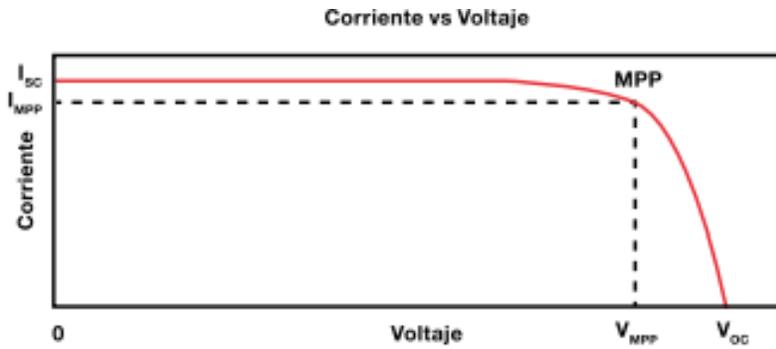


Figura 2.3.2 “Curva característica Corriente vs Voltaje”

Fuente: Elaboración propia

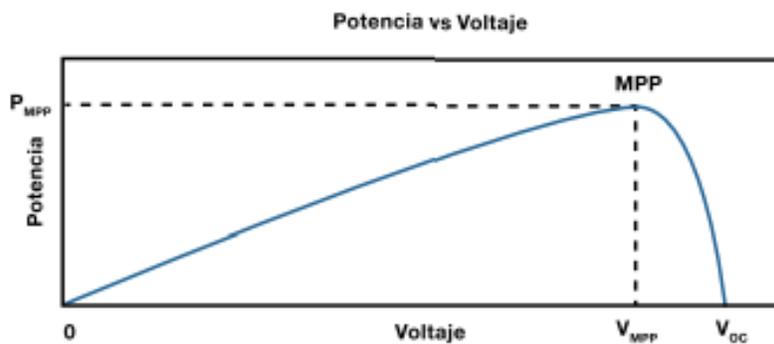


Figura 2.3.3 “Curva característica Potencia vs Voltaje”

Fuente: Elaboración propia

2.3.1 Clasificación Paneles Fotovoltaicos

Estos se clasifican según su forma, entre estos están: con sistema de concentración, de formato teja o baldosa, y bifaciales [20].

Los de concentración utilizan lentes, espejos curvados y otros tipos de ópticas para concentrar la radiación en células fotovoltaicas con el objetivo de generar electricidad.

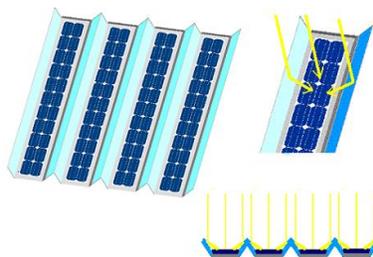


Figura 2.3.4 “Panel solar de concentración”

Fuente: Sistemas fotovoltaicos para iluminación: paneles fotovoltaicos

Los paneles de formato teja o baldosa son pequeños y están hechos para combinarse en gran número para cubrir las superficies de los tejados y paredes de las viviendas.



Figura 2.3.5 “Panel solar de teja o baldosa”

Fuente: Sistemas fotovoltaicos para iluminación: paneles fotovoltaicos

Los paneles bifaciales están basados en la capacidad de transformar en electricidad la radiación solar que se recibe por cualquiera de las dos caras del panel. Estos paneles se colocan sobre dos superficies blancas que reflejan la luz solar hacia el reverso del panel.

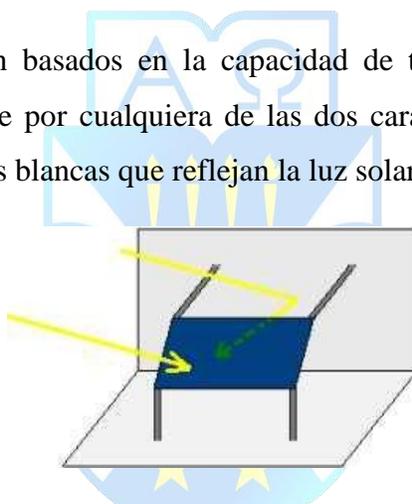


Figura 2.3.6 “Panel solar bifacial”

Fuente: Sistemas fotovoltaicos para iluminación: paneles fotovoltaicos.

2.4 Células Fotovoltaicas

Las células o celdas fotovoltaicas son componentes que se encargan de captar la energía contenida en la radiación solar y transformarla en energía eléctrica [20].

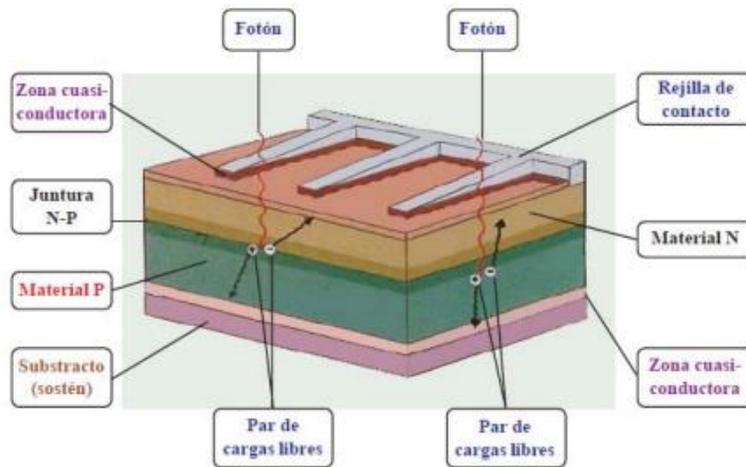


Figura 2.4.1 “Estructura típica de una célula FV”

Fuente: Sistemas fotovoltaicos para iluminación: paneles fotovoltaicos.

Estas células producen una corriente continua al incidir un haz de fotones sobre los semiconductores, esto también es conocido como el efecto fotoeléctrico [21]. Para lograr este efecto es necesaria la unión de los semiconductores PN, usando el semiconductor extrínseco P, la cual es la parte positiva donde los rayos solares no llegan y el intrínseco tipo N, parte negativa donde inciden los rayos solares [22]. Al generarse la unión y al ser expuesto a la radiación proveniente del sol que inciden en nuestro semiconductor N, la energía de los fotones es transmitida hacia los electrones para su liberación, aumentando así la carga negativa y aumentando a la vez la diferencia de potencial. Gracias a este proceso se produce el efecto fotovoltaico, el cual es donde las celdas fotovoltaicas realizan su trabajo.

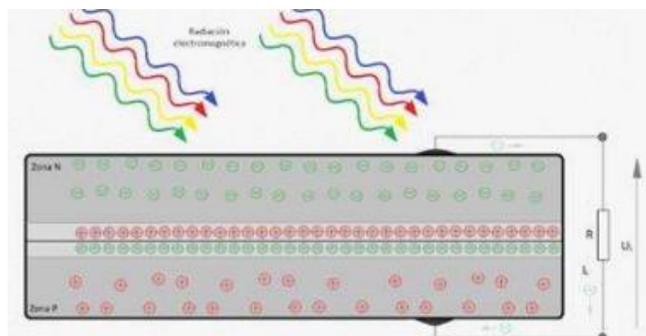


Figura 2.4.2 “Interpretación del aprovechamiento solar por parte de los paneles FV”

Fuente: Sistemas fotovoltaicos para iluminación: paneles fotovoltaicos

Las células solares se dividen en distintos tipos, pero las más usadas son las de silicio (mono cristalinas-Si y policristalinas-Si), ya que los paneles solares de este tipo son más eficientes y baratos, siendo de los más vendidos en el mercado. La eficiencia de estos es de alrededor de un 24%, llegando de a poco a lo esperado que es un 31%, y por lo demás estas pueden proporcionar una tensión de 0.5 V aproximadamente y una corriente de 35 [mA/cm^2]. La diferencia de rendimiento de estas células es pequeña, siendo los puntos importantes para realizar su elección su disponibilidad y demanda o reputación del fabricante [22]. Dentro de las células de silicio encontramos las amorfas que son más delgadas que las cristalinas con rendimientos de hasta un 16%.

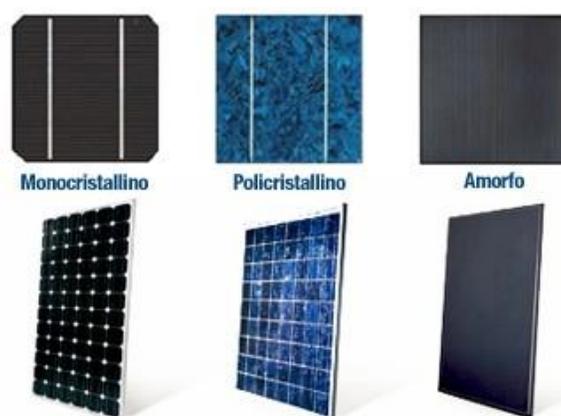


Figura 2.4.3 “Celdas solares de silicio”.

Fuente: Sistemas fotovoltaicos para iluminación:
paneles fotovoltaicos

2.5 Generadores Fotovoltaicos

Estos son dispositivos que entregan electricidad en forma de corriente continua en su salida al recibir la incidencia de la radiación solar, la cual se transforma en energía que será almacenada en nuestros paneles solares. Los generadores fotovoltaicos incluyen baterías nos permiten disponer de energía eléctrica durante las noches en las cuales no existe acumulación de energía por parte de los paneles, estos son utilizados en su mayoría en zonas aisladas donde no tenemos acceso a electricidad de manera habitual [23].

2.6 Inversores

Estos dispositivos son los encargados de transformar la corriente continua obtenida por los generadores, filtrarla y así convertirla en corriente alterna para así ser más adecuada para el uso de los usuarios. [24].

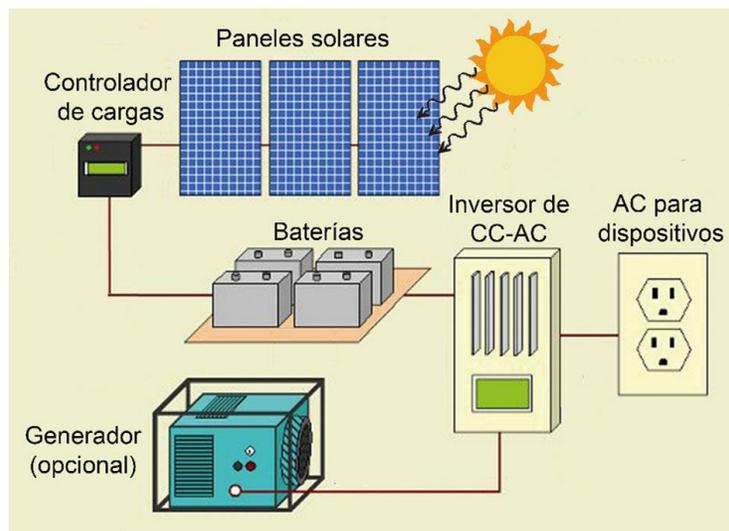


Figura 2.6.1: Generadores para sistemas fotovoltaicos

Fuente: <https://www.ayerbe.net/productos/generadores-para-sistemas-fotovoltaicos/>

2.7 Instalaciones Fotovoltaicas

Las instalaciones fotovoltaicas son aquellas cuya finalidad es satisfacer de forma total o parcial la demanda energética existente [25]. Existen 3 tipos de instalaciones:

2.7.1 Instalaciones aisladas a la red

Estas son empleadas en zonas alejadas, las cuales no tienen acceso a un suministro eléctrico público, como lo son las islas. Se separan en dos tipos de suministros, el **centralizado** el cual es un sistema que cubre las necesidades de varios usuarios y a la vez disminuye costos, el **descentralizado** el que consiste en un sistema individual para un solo usuario el cual requiera de energía.

2.7.2 Instalaciones conectadas a la red

Estas instalaciones actúan en condiciones diferentes a la aislada, la red pública funciona como disipador de energía infinita, por lo que acepta toda la energía producida tanto en centrales como en instalaciones domiciliarias. Esta no cuenta con sistema de

almacenamiento, por lo que se producen pérdidas, aunque también puede tener grandes beneficios para los usuarios.

2.7.3 Instalaciones Híbridas

En estas instalaciones se fusiona nuestra extracción fotovoltaica con otra fuente de energía renovable e incluso no limpias como el diésel, esto con el fin de satisfacer las necesidades de los usuarios cuando no existan las condiciones adecuadas para producir energía solar. Este sistema es bastante utilizado ya que es más confiable que solo abastecerse de una fuente de energía [25].

2.8 Conclusiones

La energía solar por lo general es capaz de producir una cantidad más elevada de la que es capaz de consumir, por lo que algunas veces esta energía se pierde debido a no tener fuentes de almacenamiento. La energía solar, aunque sea una fuente inagotable de energía, su extracción puede ser realizada sólo durante ciertas horas del día, por lo que es clave tener fuentes de almacenamiento de ella, ya sea por baterías o el uso de H2V, la cual será estudiada en el este Proyecto de Título [26].

El uso de energías como la solar, es una decisión que se ha tomado debido a que ocupa una fuente inagotable de energía que es la radiación solar, además de ser limpia y sustentable.

Hace mucho tiempo la única alternativa que estaba a la mano era suplir las necesidades energéticas con generadores de energía, como lo son los generadores diésel (utilizados en la isla), para así generar la energía necesaria, estos liberan una gran cantidad de CO₂ al ambiente produciendo gases de efecto invernadero, el cual es uno de los mayores causantes del calentamiento global, es debido a esto y a varios factores que la extracción de energía solar es una idea mucho más amigable con el ambiente y que ha tomado mucho más peso su uso durante los últimos años.

Otro punto que agregar es en la parte económica, es sabido que los costos asociados a un proyecto FV son altos, no así sus costos de mantención y de los beneficios que trae consigo a largo plazo [27].

CAPÍTULO 3. HIDRÓGENO VERDE

3.1 Introducción

Se sabe que durante los últimos años estamos viviendo un aumento explosivo con respecto a las concentraciones de CO_2 , en donde en efecto la atmósfera ha elevado la temperatura de nuestro planeta provocando el conocido Calentamiento Global, el cual deja consecuencias devastadoras para el medio ambiente. Para atenuar o suavizar estos efectos negativos se debe mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C esforzándose así para poder limitar el aumento a 1.5°C , obviamente para lograr dichas cifras se debe disminuir drásticamente el aumento de CO_2 [28].

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica y contiene un solo átomo compuesto por un protón y un electrón, también es el elemento más ligero, simple y abundante en nuestro planeta. Últimamente se le ha prestado mucha atención por su potencialidad y capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y así luchar contra el cambio climático [29].

Actualmente la industria del Hidrógeno trabaja cada día en reducir el impacto en los procesos de producción, y contaminación, para así conseguir un hidrógeno más ecológico y sustentable.

Es importante recalcar que Chile no tiene combustibles fósiles, por ende, todo el diésel que llega al país es importado, generando así gastos elevados en su transporte. Más costoso es aún para el caso de la Isla Mocha, en donde la única forma de recibir dicho recurso es a través del transporte marítimo, por lo que económicamente vendría siendo poco rentable utilizar esta fuente de energía.

Hoy en día existen diversas maneras de producir Hidrógeno, como por ejemplo en un proceso industrial renovable llamado “Biogás”, método por el cual es producido mediante un proceso de reformado de vapor [30]. La otra manera es utilizar energías renovables para producirlo a través del proceso electroquímico ya mencionado, “**La electrólisis**”.

3.1.2 Tipos de Hidrógeno

Dentro del grupo de los tipos de hidrogeno tenemos:

Gris: El cuál posee origen fósil (gas natural), es de **altas emisiones** ya que es producido sin ningún tipo de control de las emisiones contaminantes y no hay presencia de energías renovables para la generación de energía.

Azul: También posee origen fósil pero esta vez hay captura de CO_2 , es de **bajas emisiones**, esto quiere decir que se logra capturar emisiones generadas en su producción a través de electro carburos, actualmente se logra capturar alrededor de un 90% del CO_2 emitido.

Verde: Se origina por medio de una fuente renovable, por ejemplo: Eólica, biomasa, hidroeléctrica, biogás, solar, etc. (Agua con electricidad 100% renovable). Se refiere al proceso en donde se ha utilizado energía de fuentes renovables para producirlo evitando el CO y el CO_2 en todo el ciclo es de cero emisiones. En este caso hablamos de Hidrógeno producido a partir de la electrólisis [29].

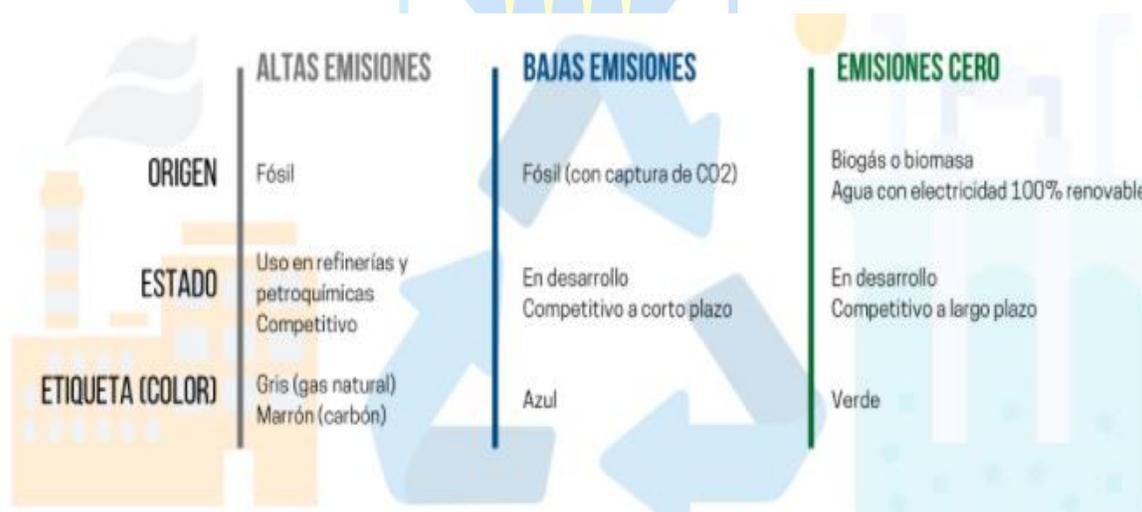


Figura 3.1.1 “14 Tipos de Hidrógeno según su color”

Fuente: MotorPassion.com Tipos de Hidrogeno según su color.

3.2 El Hidrógeno Verde

Esta es la denominación que se le da al Hidrógeno que ha sido generado por medio de fuentes de energía renovable. El Hidrógeno Verde es un portador de energía no contaminante que se obtiene mediante el proceso de la electrólisis del agua, utilizando recursos energéticos renovables, como por ejemplo la energía eólica y energía solar las cuales, al reaccionar con el calor y oxígeno, permiten generar electricidad sin emitir CO₂.

El H₂V es un vector energético muy versátil, debido a los diversos usos que se le puede dar, como el poder transformarse en electricidad o en un combustible sintético, además de poder ser utilizado tanto como fines industriales, comerciales o domésticos.

Es una solución energética que conecta distintos sistemas energéticos y que a su vez nos presenta una oportunidad de ayudar tanto descarbonizando sectores en dónde el diésel es su fuente principal de energía, procesos de altas temperaturas, industria, transporte pesado, minería, o lugares en donde aún no se dispone de una solución eléctrica. Como el claro ejemplo de la Isla Mocha, la cual recién en el año 2013 tuvo acceso a 24 horas continuas de electricidad en sus hogares [31].

Consideremos que Chile tiene una geografía y condiciones climáticas privilegiadas para el desarrollo de la industria del Hidrógeno Verde, siendo ricos en energías renovables necesarias para su producción, fuertes vientos de norte a sur para la energía eólica y la radiación solar más alta del planeta, ventajas que podrían convertir a Chile en un productor eficiente y competitivo de hidrógeno verde con respecto a las grandes potencias mundiales. La selección de la estrategia de acondicionamiento, almacenamiento, transporte y distribución depende del uso final, lo que contempla: **¿para qué?(tipo), cuánto(tiempo), ¿cuánto abarca?(volumen) y dónde se utilizará este recurso(distancia).**

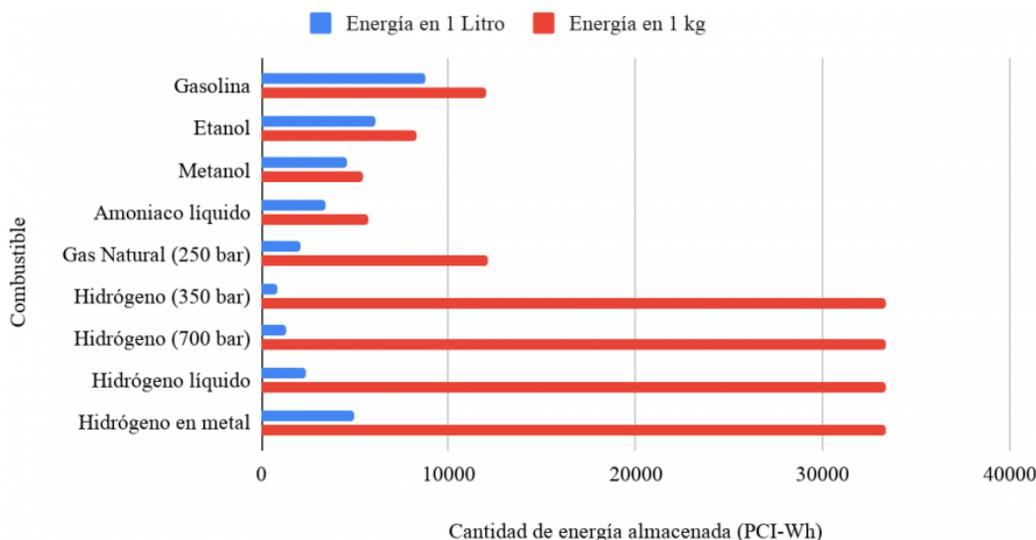


Figura 3.2.1 “Gráficas de energía contenida en distintos combustibles 2020”

Fuente: Generadoras.cl Tipos de energía, Hidrógeno Verde

3.2.1 ¿Cómo se produce?

Pese a ser el elemento más abundante en nuestro planeta, obtenerlo no es fácil, debido a que no se encuentra de forma aislada en la naturaleza, por lo cual éste se obtiene a través de sustancias que lo contienen, entre las más particulares se encuentran: el agua, el gas natural y el carbón [31].

Actualmente existen dos formas de producirlo en masa, primeramente, está la más barata y por ende la más utilizada, en la cual se obtiene el Hidrógeno a través de Hidrocarburos, se le conoce como el método reformado con vapor de agua del gas natural. Este proceso combina, el metano con vapor de agua para producir CO_2 y H_2 mediante una reacción química endotérmica, por ende, no es muy ecológico ya que para generarlo se sigue dependiendo de combustibles fósiles, y emana CO_2 al medio ambiente. Debido a los altos niveles de emisiones y contaminantes, se le denomina “**Hidrógeno Gris**” al H_2 resultante de este proceso.

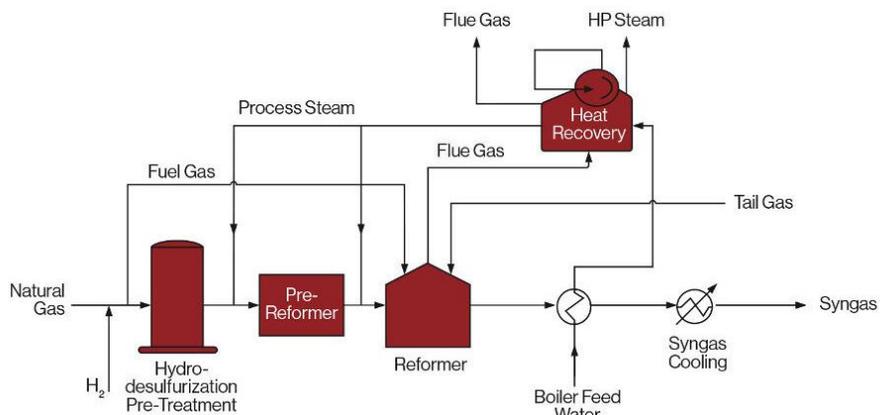


Figura 3.2.2 “Diagrama producción de Hidrógeno por reformado de metano a vapor”

Fuente: engineering-airliquide.com producción de Hidrógeno por reformado metano con vapor.

Y la segunda, a la cual se le dará más relevancia es en la cual se obtiene el Hidrógeno gracias al proceso de electrólisis a partir de fuentes renovables, en síntesis, dicho proceso consta en la descomposición de las moléculas del agua (H_2O), separando así el Hidrógeno del Oxígeno, a su vez es el menos utilizado debido a los costos asociados a los procesos utilizados, siendo hoy en día uno de los desafíos más grandes que tiene la humanidad, debido a la importancia que tiene el Hidrógeno para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [32].



Figura 3.2.3 “Representación gráfica de la obtención del Hidrógeno verde”

Fuente: BernotH2.com, el Hidrógeno Verde

3.2.2 Implementación del H2V

Primeramente, se sabe que para obtenerlo es necesaria una fuente de energía renovable para reducir las emisiones de CO_2 , seguido por una conexión de alto voltaje, el suministro de agua, un electrolizador, compresores para reducir el volumen tanto del Hidrógeno como del Oxígeno y por último tanques de almacenamiento.

Para su implementación debemos considerar que el “Hidrógeno Solar”, utilizado o implementado, no debe usar hidrocarburos, mediante el proceso de electrólisis inverso.

En este proceso verde, la energía “infinita” del sol es convertida en electricidad mediante paneles fotovoltaicos, que a su vez alimentarán una celda, en donde al agua, en un ambiente alcalino, se le hace circular corriente continua DC que descompone el H_2O en el Hidrógeno y Oxígeno.

El Oxígeno producido se almacena con fines industriales o médicos, mientras que el Hidrógeno será el almacenado y transportado para su posterior uso, en celdas o pilas de combustible, dónde al ser mezcladas con el oxígeno del aire se generará electricidad, la que a su vez fácilmente puede alimentar un motor eléctrico con un gran potencial por sobre todo en la industria del transporte [33].



Figura 3.2.4 Implementación “Primera planta de H2v de España. “Benorth2”

Fuente: Benorth2.com “Hidrógeno verde”

A su vez el Hidrógeno se puede combustionar para generar energía calórica y reemplazar el gas natural tanto a nivel industrial como domiciliario.

3.2.3 Ventajas en la utilización del H2V

Con respecto a otras energías renovables, el Hidrógeno Verde nos ofrece una diversidad de ventajas, mencionando la primera y por así decirlo también, más importante, que este sea **100% sostenible**, lo cual nos quiere decir que no emite gases contaminantes, tanto en su proceso de combustión como de producción, lo que nos ayudaría a reducir drásticamente nuestra dependencia con combustibles fósiles [34].

Gestión y almacenaje, su gestión y almacenaje es fácil y continua, lo que permite su utilización posterior no solo en el momento de producción.

Otra gran ventaja para mencionar es su **Versatilidad**, el H2V puede ser utilizado para convertirse en la fuente de respaldo eléctrico de las plantas energéticas renovables, en combustibles sintéticos como por ejemplo para descarbonizar el sector del transporte, así como un insumo energético para las industrias más contaminantes como lo son la acerera y cementera [35]. Es decir, puede ser utilizado con muchos fines, como por ejemplo domésticos, comerciales, industriales, de transporte, entre otros. Su versatilidad lo posiciona como un producto altamente demandado a nivel mundial.

A su vez, presenta un poder calorífico 3 veces más grande que el diésel y el gas natural. Por cada unidad de peso, el Hidrógeno Verde tiene mucha más energía que las baterías de litio.

Es **transportable**, esto quiere decir que puede mezclarse con el gas natural hasta en un 20% y viajar por las mismas vías e infraestructuras que el gas (modificando las redes existentes para hacerlas compatibles) [34].

Otra de sus ventajas es su **alta densidad energética**, lo que implica que en una baja cantidad de masa guarda una gran cantidad de energía, siendo incluso más denso en este aspecto que combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural [35].

Como país poseemos una gran ventaja con respecto a **nuestra geografía**, tanto como para la generación de energía fotovoltaica como eólica, una industria que se dedique al H2V daría la oportunidad de pasar de ser importadores de gas, a ser grandes exponentes y exportadores mundiales de Hidrógeno Verde. Es ideal para grandes consumidores de energía.

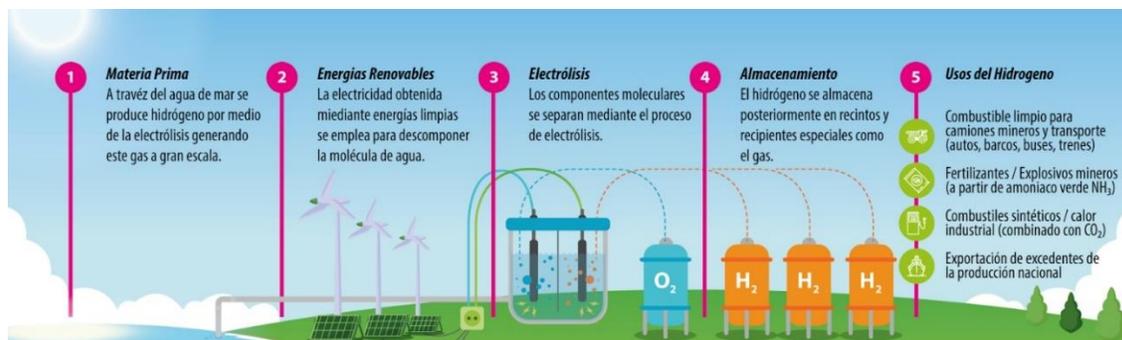


Figura 3.2.5 “Diagrama producción Hidrógeno Verde”

Fuente: Energía.Gob.cl El Hidrógeno verde y sus aplicaciones

3.2.4 Impacto

Si nos referimos al impacto del H₂V como tal, se debe considerar que como combustible, ha triplicado su demanda a nivel mundial desde 1975, como lo señala la AIE (Asociación de la Industria Eléctrica Electrónica), hasta llegar a los 70 millones de toneladas, con lo que respecta solo hasta el año 2018 [36].

Se sabe que este gas se ha utilizado como combustible desde comienzos del siglo XIX, incluso es importante mencionar el rol fundamental que está acaparando en el área aeroespacial, tanto así, que el primer viaje tripulado a la luna fue gracias al Hidrógeno, utilizando su uso como combustible para el cohete Apolo 11. A su vez también para la generación de electricidad a bordo de los módulos de las naves. Se tiene como ejemplo cuando tres pilas de combustible generan suficiente energía como para energizar todos los instrumentos de la nave espacial [37].



Figura 3.2.6 “Tanque de Hidrógeno en satélite espacial”.

Fuente: NASA.com

Según AleaSoft, la Revolución del Hidrógeno deberá ir emparejada con la Revolución fotovoltaica, ya que estas se compensan entre sí, o sea son complementarias. Esto quiere decir que la capacidad de usar el hidrógeno para almacenar energía suplirá la intermitencia de la fotovoltaica. Juan Carlos Jobet ex-ministro de minería sostiene que este combustible ayudará a que la minería deje de quemar más de 2 millones de m^3 de Diesel al año [37].

“Para Chile el Hidrógeno Verde será un recurso estratégico tan importante como lo es el cobre para el desarrollo económico del país, jugará un rol fundamental en el cumplimiento de los compromisos de reducción de las emisiones ante el cambio y los objetivos climáticos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” [38].

El impacto del H₂V es tan abrupto que ya está instaurado en países como Estados Unidos, China, Francia, Alemania, entre otros, desarrollando y aspirando así a convertir el Hidrógeno en una economía a escala mundial [34].

Con respecto al almacenamiento de energía, éste genera un gran impacto debido a que los tanques de hidrógeno comprimido son capaces de almacenar energía durante largos periodos de tiempo, además de ser más sencillos de operar que las baterías de litio, al ser más ligeros. Sin olvidar el impacto con respecto al transporte que este ocasiona, con planes a futuro de descarbonizar todo el transporte pesado, la aviación o el transporte marino. Actualmente ya existen proyectos promovidos por la Unión Europea (UE), en dónde planean introducirlo en aviones con pasajeros, dichos proyectos son Hycarus y Cryoplane [39].

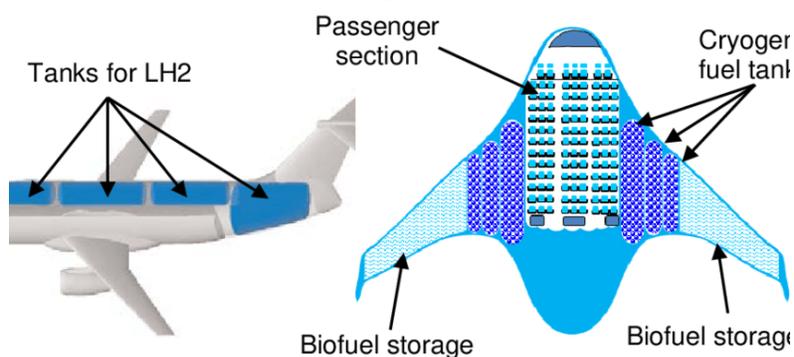


Figura 3.2.7 “Esquema de almacenamiento de tanques de H₂ proyecto Cryoplane”

Fuente: BBC, LH₂ tanks storage scheme of "Cryoplane" Project.

3.2.5 Almacenamiento del Hidrógeno Verde

Uno de los desafíos más grandes a la hora de la utilizar el H₂V como combustible, es el lograr su correcto almacenamiento, debido a su alto nivel de inflamación no pueden existir fugas. Por ende, el almacenamiento debe ser compacto, ligero y seguro. Al tener una gran densidad energética se deben considerar métodos más avanzados para almacenarlo y aumentar esta densidad.

Almacenamiento Gaseoso: en la actualidad esta es la manera más utilizada para almacenar dicho componente, debido a su economía, fácil funcionamiento y mantención, el costo que requiere es de aproximadamente 0.3 US por kg de Hidrógeno, lo que hace referencia a que genera una reducción de un 70% aproximadamente con respecto a los gastos asociados al almacenamiento líquido. En este tipo de almacenaje se utiliza menos energía para comprimirlo, pudiendo llegar así en una presión de 700 bar a un 80-91% de eficiencia [40].

Este almacenamiento puede ser en **Tanques a presión o Estructuras sólidas**, que en la mayoría de los casos son especies de Containers modificados para su respectivo uso. Acá el gas se comprime a mínimo 200 atm y el consumo energético para licuar el H₂ es de 13,3[kWh/kg]. Cabe recalcar que mientras más Hidrógeno se almacene más gruesos deben ser los tanques que lo almacenan, agregándole así más peso al sistema que lo transporte [32].

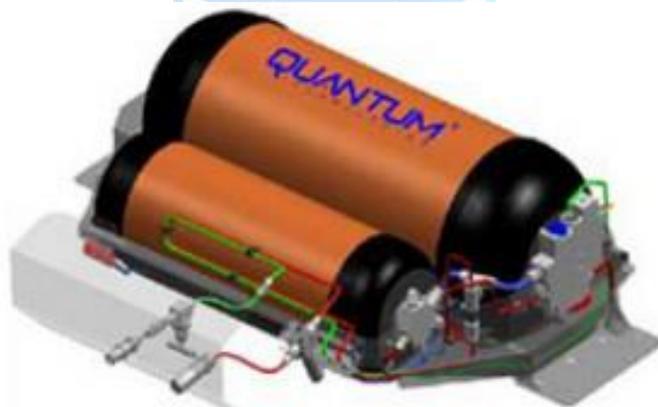


Figura 3.2.8 “Tanques de Hidrógeno a presión (Quantum) para su almacenamiento”

Fuente: Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

Una alternativa para el almacenamiento gaseoso son las microesferas de vidrio, donde el proceso de carga se realiza aprovechando la permeabilidad del Hidrógeno a alta presión (350-700 bar), y temperaturas de 300° aproximadamente en los huecos de las microesferas. Una vez realizada esta carga, el sistema se enfriará hasta el punto de llegar a una temperatura ambiente para así forzar a que el gas quede retenido en las microesferas. Finalmente, para su posterior uso, es necesario calentarlas a una temperatura de 200-300°C para así liberar el Hidrógeno de una forma controlada y lograr alimentar la pila de combustible o motor [32].

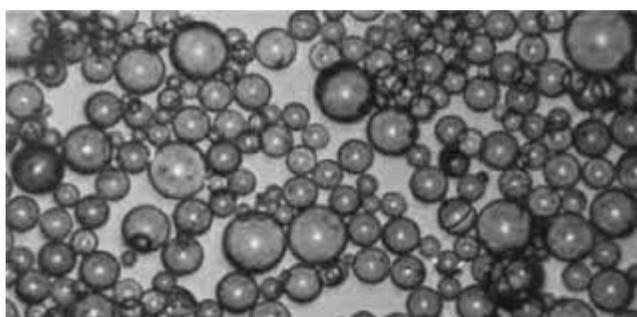


Figura 3.2.9 “Microesferas de vidrio para almacenaje de Hidrógeno”.

Fuente: Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

La desventaja es que permite guardar una menor cantidad de Hidrógeno. También así se presenta una baja densidad y alta presión de llenado como también el uso de temperaturas elevadas. La ventaja es que son sumamente seguras debido a que el Hidrógeno almacenado dentro está a baja presión, por ende, también nos permite almacenarse en tanques moldeables.

Almacenamiento líquido: para almacenar de esta forma es necesario bajar la temperatura del H_2 alrededor de los $-250^\circ C$, para así poder licuarlo. Dicho componente debe ser aislado y refrigerado, para seguir manteniéndolo en las mismas condiciones, por ende, el costo que este requiere irá en aumento de 1 US por cada kg de Hidrógeno [31]. Almacenar de esta manera genera una gran ventaja con respecto a la cantidad de energía que es posible almacenar, pudiendo guardar aproximadamente al doble del gas en el mismo volumen.

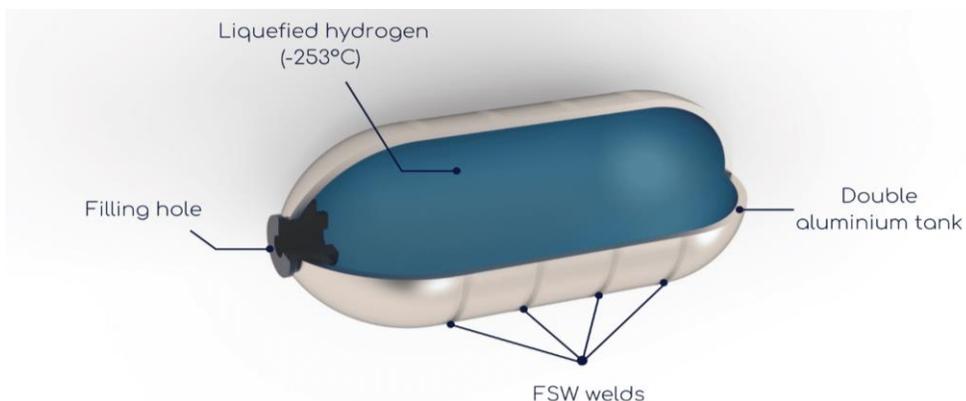


Figura 3.2.10 “Esquema de tanque Criogénico de almacenamiento de Hidrógeno para la industria aeronáutica”

Fuente: <https://stirweld.com>

Una gran ventaja que ofrece es su alta densidad energética por unidad de volumen, pero una gran desventaja es que en el proceso de licuación se pierde aproximadamente entre el 30 y 40% de la energía, además de las pérdidas por evaporación en los periodos en que el sistema no es utilizado y por último el imprescindible uso de contenedores criogénicos los cuales deben estar sumamente aislados.

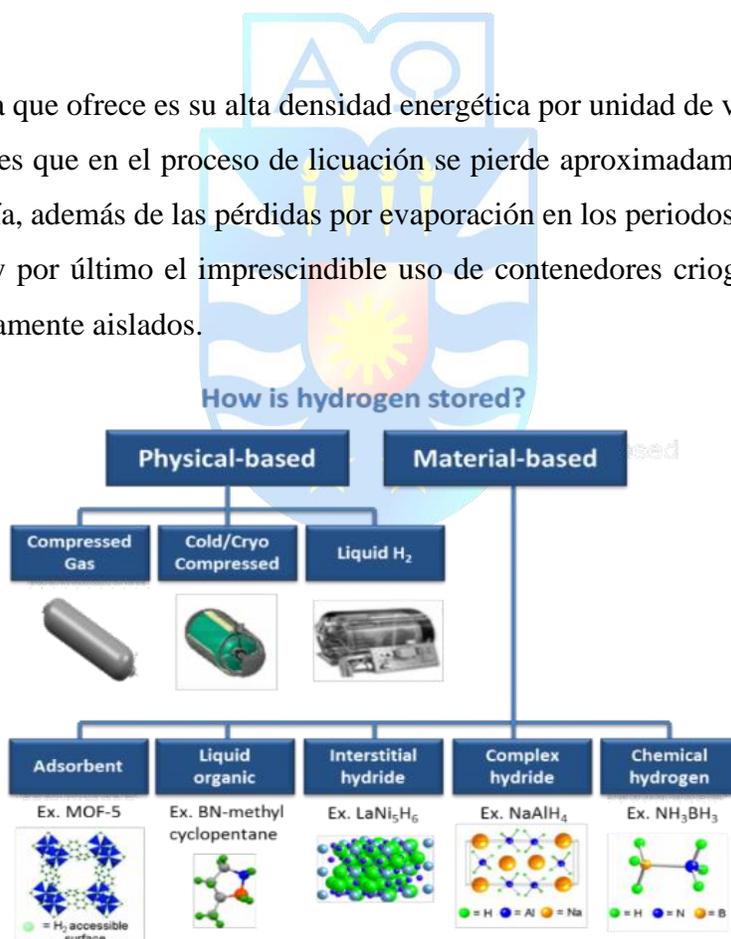


Figura 3.2.11 “Tipos de tanques para almacenamiento de Hidrógeno”

Fuente: Apilados.com, almacenamiento de Hidrógeno comprimido, tipos de tanques.

Existe un sistema de almacenamiento líquido es en el cual se usan disoluciones de borohidruros, teniendo como ventaja principal que permite una generación de Hidrógeno segura y controlada, mientras que su desventaja revoca en que el producto de la reacción debe ser almacenado y tiene que ser descargado utilizando un sistema aparte.

Almacenamiento sólido: este tipo de almacenamiento es potencialmente seguro y eficiente, no solo para aplicaciones estacionarias, sino también de transporte. Este se subdivide en los siguientes grupos, dependiendo del material utilizado para su adecuado almacenaje.

- **Basados en Carbono:** también llamados nano fibras y nanotubos de grafito (CTN's), constituidos por redes Hexagonales de Carbono cuya forma es curva y cerrada. Son sistemas que además de ser ligeros, huecos y porosos brindan una alta resistencia mecánica, por ende, genera un gran interés en el área del reforzamiento estructural de materiales, por su bajo peso, alta resistencia a la tracción y enorme elasticidad.

Detallando su comportamiento con respecto a su almacenamiento, gracias a su baja masa y alta capacidad de absorción, se presenta como el método más eficiente.

Este sistema puede almacenar el doble de Hidrógeno que el actualmente obtenido por los tanques de H_2 , una de sus desventajas radica en que trabaja a temperaturas altamente bajas (menores a $196^\circ C$) ya que, al bajar su temperatura, se termina evaporando la mayor parte del Hidrógeno.

Actualmente se desconoce tanto la cantidad de Hidrógeno que puede almacenar este sistema, como también como se almacena, en otras palabras, no se sabe si al enlazar químicamente el nanotubo con el Hidrógeno se mantiene su estructura molecular o no [41].

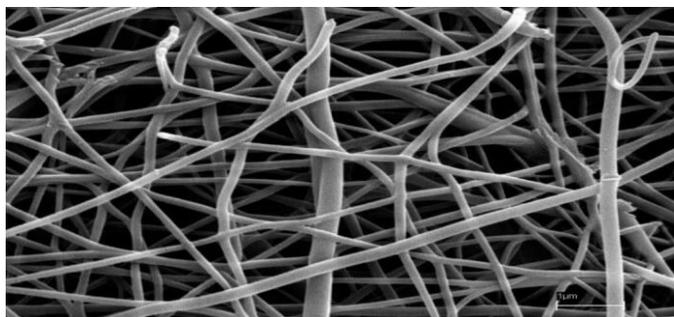


Figura 3.2.12 “Nanofibra o nanotubo de carbono”

Fuente: sciencealpha

- **Basados en Hidruros recargables:** una de las características del Hidrógeno es que tiene la propiedad de reaccionar con diferentes metales de transición formando compuestos los cuales son llamados Hidruros.

Teniendo como ventaja que las reacciones producidas en el son reversibles en condiciones óptimas con respecto a su presión y temperatura, esto quiere decir que su masa metálica puede ser cargada y descargada infinitamente pudiéndose utilizar, así como un depósito de almacenamiento sólido de H_2 .

Otra particularidad es que operan a presiones moderadas además de limpiar el componente, por ende no existe pérdida asociada, liberando el Hidrógeno cuando se aplica calor a los materiales.

Este tipo de almacenamiento es seguro, controlable y a su vez a diferencia del almacenamiento líquido, éste permite almacenar más H_2 por unidad de volumen.

Su gran desventaja data en que su peso es elevado, por lo que no es factible para brindarle aplicaciones móviles, siendo sumamente útil en aplicaciones estacionarias aisladas y con energías eléctricas provenientes de fuentes renovables [41].



Figura 3.2.13 “Hidruros metálicos recargables para el almacenamiento de H₂”

Fuente: Cordis, Advanced metal hydride tanks integrated hydrogen applications.

3.2.6 Transporte y su distribución

El Hidrógeno principalmente es transportado por camiones, ferrocarriles, barcos, entre otras, ya sea en su estado líquido, gaseoso o sólido. Debido a su gran potencial y a los sistemas descubiertos para su almacenamiento en la actualidad, nos permite un fácil manejo con respecto a su transporte y liberación según se requiera [42].

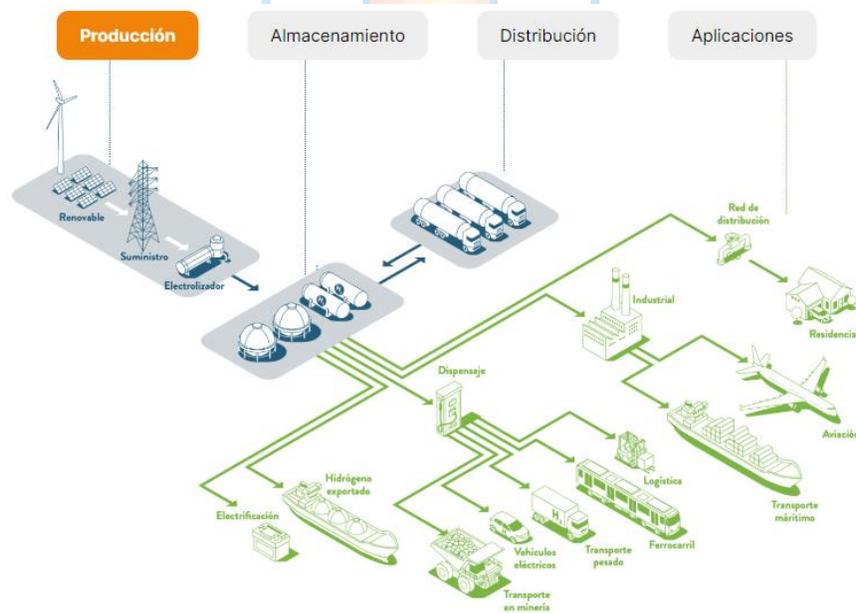


Figura 3.2.14 “Diagrama aplicaciones y distribución del H₂V”

Fuente: H2Chile.cl, Cadena valor y distribución, “Asociación Chilena de Hidrógeno”

Transporte de Hidrógeno gaseoso

El Hidrógeno Gaseoso en la mayoría de los casos está comprimido a presiones entre 200 y 700 bar en depósitos convencionales de gas hechos de acero austenítico. Para presiones superiores se desarrollan nuevos materiales compuestos de fibra de carbono.

Estos depósitos pueden ser transportados por vía terrestre en camiones acondicionados, ferrocarriles o barcos [43].



Figura 3.2.15 “Hidrógeno almacenado en containers, siendo transportado por ferrocarriles”

Fuente: Pv magazine

La forma típica de transporte en este caso son los camiones tipo “tube tráiler”, capacitados para transportar grandes cantidades de H_2 utilizando varios cilindros o tubos de gas presurizados ubicados dentro de un marco protector.

La gran desventaja que posee es su **alto costo variable**, debido al bajo nivel de volumen que transporta en comparación con la cantidad de kilómetros a recorrer. Pero su ventaja prevalece en su **bajo costo fijo y la flexibilidad** que posee, implicando así que se debe recorrer una larga distancia (mayor a 1000[km]), es ahí donde este pasa por un proceso de licuación, empleando camiones cisterna con un sistema criogénico para su posterior transporte. Por otra parte, los tubos al ser de un material como el acero poseen un peso neto muy elevado y un volumen relevante a la hora de su transporte [43].

En la actualidad ya está establecida la comercialización del transporte de Hidrógeno por tuberías, aunque aún no está desarrollado su funcionamiento para transportarlo a grandes distancias.



Figura 3.2.16 “Camión “tube tráiler” vertical, transportador de Hidrógeno comprimido”

Fuente: Induambiente

Gaseoductos

Prácticamente está presente en todas las industrias, debido a que los gases a transportar son a distancias “acotadas”, actualmente la red más grande implementada tiene un alcance de 879 km recorriendo Bélgica, Holanda y Francia.

Con respecto a los costos, dependerán netamente de las especificaciones de las tuberías a utilizar, su diámetro, por ejemplo. A diferencia del gas natural, el Hidrógeno al poseer una densidad energética por unidad de volumen menor, se necesitará tuberías de mayor diámetro para solventar la presión a la cual estará transportando dicho elemento y suministrar así la misma cantidad de energía [44].



Figura 3.2.17 “Sistema de transporte de Hidrógeno por gaseoductos”.

Fuente: modec.fr

Con lo mencionado anteriormente es de suma importancia mencionar que el costo total de una línea de Hidrógeno es aproximadamente 6 veces mayor a la del gas convencional [40].

Transporte líquido

Este transporte permite ser maniobrado vía terrestre (camiones, trenes) y vía marítima (barcos). El hidrógeno en estado líquido, al poseer una densidad de $70,79 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (prácticamente el doble a la que se obtiene utilizando el proceso de compresión), sumando también los gastos que requiere mantenerlo en óptimas condiciones ya sea por enfriamiento o compresión, con respecto al transporte sólido resulta más conveniente transportarlo en forma líquida [42].



Figura 3.2.18 “Barco “Suiso Frontier”, primer buque comercial del mundo para el transporte de Hidrógeno líquido”

Fuente: Ecoinventos

En el proceso de enfriamiento o licuación el consumo energético ronda de 12 a $13,3 \text{ [kWh/kg]}$ mientras que utilizando el método de compresión el consumo energético varía de 2,3 a 3 [kWh/kg] . Al consumir una gran cantidad de energía generará pérdidas entre un 30-40% respectivamente. Los costos al emplear el proceso de licuación son elevados, pero presentan una gran relevancia con respecto a la economía de escala.

Con respecto al transporte por camiones o barcos, es importante mencionar que se generan pérdidas entre un 0,2 y 0,4% del Hidrógeno líquido por día, esto quiere decir que se necesitará desarrollar la velocidad de estos medios de transporte para disminuir sus pérdidas asociadas. Por ende, con lo mencionado anteriormente, se concluye que el método de transporte más factible dependerá netamente del volumen y la distancia que se necesite trasladar [45].

3.3 Electrólisis

La electrólisis es un proceso químico donde una sustancia o cuerpo inmerso en una disolución se descompone mediante la acción de la corriente continua, en otras palabras, se liberan electrones por los aniones del ánodo, produciéndose así la oxidación, para posteriormente capturar los electrones por medio de los cationes en el cátodo, produciendo así una reducción.

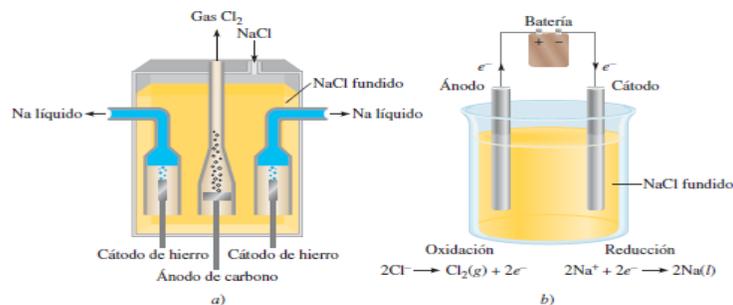


Figura 3.3.1 “Proceso químico de Electrólisis”

Fuente: Chang, Raymond; Goldsby, Kenneth A. (2013). Química.

Entre todas las alternativas que ofrecen para la generación de Hidrógeno utilizando energías renovables la más importante dado todos los puntos mencionados anteriormente, es la **Electrólisis**, el proceso consta en la descomposición de las moléculas del agua H_2O en H_2 y O_2 , mediante la aplicación de una fuente eléctrica ubicada en un dispositivo llamado electrolizador (dispositivo que genera corriente continua para la realización de la electrólisis) [34].

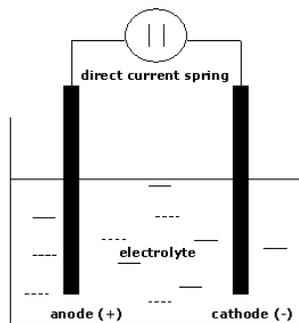


Figura 3.3.2 “Diagrama electrolito o electrolizador”.

Fuente: IdeaGreen, Hidrógeno verde y sus tipos de electrolizadores.

El proceso se realiza en un electrólito, una solución acuosa o sales disueltas que den la posibilidad a los iones ser transferidos entre los dos electrodos [46].

Para este proceso se aplica corriente continua a través de unos electrodos los cuales estarán sumergidos en el agua y conectados a la fuente de alimentación, es ahí donde cada uno de los electrodos va a atraer iones de diferente polaridad, los negativos por el ánodo y los positivos por el cátodo, así es como se producirá una transferencia de electrones y se habrá efectuado el proceso, separando el oxígeno del hidrógeno, a esto se le conoce como **Reacción Oxidación-Reducción (REDOX)** [47].

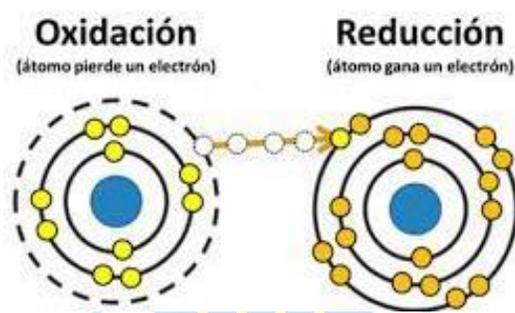


Figura 3.3.3 “Esquema oxidación y reducción”

Fuente: Acquatecnologiaperu.com, Potencial Redox

La ecuación básica que describe la electrólisis del H₂O es:



En otras palabras, el proceso de Electrólisis convencional se puede invertir y dividir en 2 partes, utilizando una celda electroquímica (de manera que en vez de utilizar se pueda generar electricidad), y un catalizador junto a la membrana de intercambio de protones.

En uno de los lados del equipo (él ánodo), se alimenta Hidrógeno-gas molecular (H₂), los cuales serán divididos por el catalizador en iones de Hidrógeno. Esto quiere decir que los electrones son separados de éste, para así ser forzados a viajar por un circuito eléctrico, produciendo la corriente eléctrica. Por otro lado, los iones del H pasarán a través de la celda hacia el otro extremo para así juntarse con el Oxígeno-Gas (O₂) inyectado por el cátodo,

gracias a esto, aquí se juntan los electrones que se habrían separado para viajar por el circuito para así con la ayuda del catalizador, formar agua [2].

3.3.1 Tipos de Electrólisis

Actualmente existen dos tipos de electrólisis y se puede considerar un tercero, el cual actualmente sigue en estudio constante para su mejoramiento y funcionalidad.

Electrólisis Alcalina Convencional (EA)

Dentro del proceso, es la tecnología más desarrollada y comercial, puesto que es simple, de bajo costo y requiere un mantenimiento bien sencillo, por el hecho de ser estable y no tener presencia de metales nobles.

Este consta en descomponer el H_2O en el cátodo del Hidrógeno H^+ y HO^- , en donde este último pasará a través del electrolito líquido y de una membrana de separación, liberando así el O_2 en el ánodo.

Cabe mencionar que el electrolito es una solución acuosa compuesta por $NaOH$ y KOH , en donde su temperatura de operación bordea los 343 y 353[K], con una presión de hasta 3[MPa].

Sin embargo, en este proceso las densidades de corriente que se obtienen son bajas, ya que se trabaja dentro de límites de operación para así no producir mezcla de Hidrógeno con Oxígeno, por ende, hay una pérdida de energía producida. Funciona mejor en plantas de alta generación y de corriente estable [2].

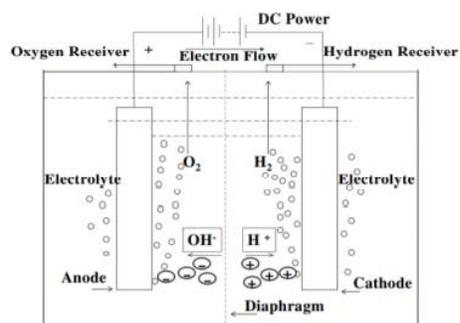


Figura 3.3.4 “Diagrama funcionamiento electrólisis alcalina”

Fuente: IdeaGreen, Hidrógeno verde y sus tipos de electrolizadores

Electrólisis de membrana de electrolito de polímero o de membrana polimérica protónica (PEM)

Es un tipo de electrólisis dónde el electrolito es una membrana polimérica sólida que conducirá Hidrógeno, en este proceso hay un intercambio de protones y solo el agua desionizada sin ningún tipo de suplemento electrolítico alimentará a la celda, es decir que se alimenta de agua pura, por ende, el H₂ producido será un 99.9% puro.

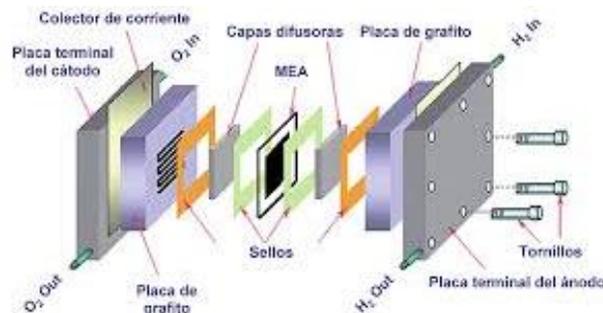


Figura 3.3.5 “Placas de combustible del tipo PEM”

Fuente: IdeaGreen, Hidrógeno verde y sus tipos de electrolizadores.

En este proceso las densidades de corriente obtenidas son las más elevadas y por ende su respuesta será más rápida, dinámica y vibrante. Punto a favor muy gratificante en el área de las energías renovables. Funciona bien en plantas de generación de energía más pequeñas y con alta variabilidad energética [2].

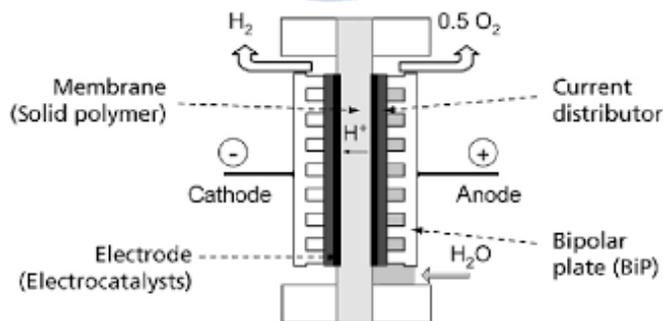


Figura 3.3.6 “Esquema simplificado de celdas de electrólisis PEM”

Fuente: ResearchGate esquema simplificado celdas electrolisis.

Electrólisis de estado sólido o Celda electrolizadora de estado sólido

Consiste en una celda de combustible de óxido sólido, la cual cumple la función de lograr la electrólisis de modo regenerativo y así mediante el uso de un electrólito de óxido sólido o cerámica producir el Hidrógeno y Oxígeno. Este proceso aún no se comercializa, debido a sus actuales estudios y mejoras.

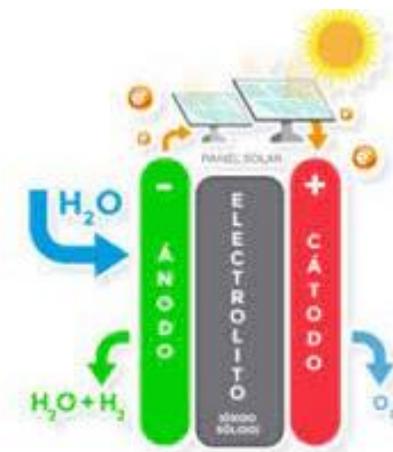


Figura 3.3.7 “Diagrama funcionamiento electrólisis de estado Sólido”

Fuente: IdeaGreen, Hidrógeno verde y sus tipos de electrolizadores.

Este sistema sólido trabaja a altas temperaturas, alrededor de los $500-1000^{\circ}C$, acá el electrolito es el encargado de conducir los iones del O_2 .

Es importante recalcar que, para este proceso, la eficiencia es de un 100%, esto quiere decir que no existen pérdidas asociadas y su consumo de energía eléctrica es menor. Puede efectuarse el proceso a altas presiones, no necesita de metales nobles para su funcionamiento, y es reversible a una pila de combustible [48].

El único problema existente en este proceso repercute en que, al trabajar a altas temperaturas, la durabilidad de sus componentes no se ajusta a los requerimientos de las energías renovables. Situación que podría llegar a ser una ventaja si hablamos de acondicionar dicho proceso en sistemas en donde se libere calor para así ser ocupado.

Tabla 3.3.1 “Comparativa entre electrolisis PEM y Alcalina”

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Electrolisis Alcalina	Tecnología: la más antigua y bien establecida Costo: más barato y efectivo Tipo de catalizador: noble Durabilidad: a largo plazo Pilas: rango MW Eficiencia: 70% Comercializado	Densidad actual: baja Grado de pureza: bajo (cruce de gases) Electrólito; Líquido y corrosivo Dinámica: operación dinámica baja Rango de carga: bajo para carga parcial Presión: baja presión operativa
Electrolisis PEM	Densidad actual: alta Eficiencia de voltaje: alta Rango de carga: buen rango de carga parcial Diseño del sistema: compacto Grado de pureza: alta pureza de gas Dinámico: operación altamente dinámica Respuesta: respuesta rápida del sistema	Tecnología: nueva y parcialmente establecida Costo: alto costo de los componentes Tipo de catalizador: catalizador noble Corrosión: ambiente ácido. Durabilidad: comparativamente baja Pila: debajo del rango de MW Membrana: limitada y costosa. La comercialización es a corto plazo.

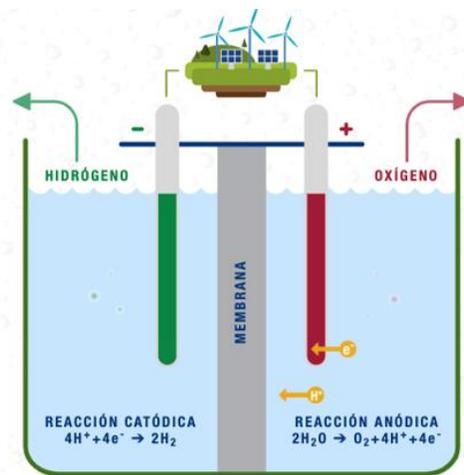
Fuente: IdeaGreen, Hidrógeno verde, tipos de electrolizadores

3.3.2 Eficiencia de electrolizadores

En la actualidad los electrolizadores alcalinos son los que más se comercializan, ya que poseen más capacidad llegando a 40 MW, mientras que los electrolizadores del tipo PEM, al ser más pequeños poseen una capacidad menor, bordeando los 6-10 MW [49].

Si nos referimos a la eficiencia, comenzamos con los **electrolizadores alcalinos**, en donde dependiendo de las condiciones, se podría llegar hasta un 93% a 1 [bar], mientras que hasta un 80% a 200 [bar].

Con estos electrolizadores se pueden obtener de 150-300 [Nm^3/h], **medidor normal al cubo por hora**, la cual es la unidad utilizada para medir el caudal de gas. El 'Normal' se refiere a condiciones normales de 0 ° C y 1 atm (atmósfera estándar = 101,325 kPa, para fines prácticos, se redondea a 1 bar) consumiendo una energía de 3.8- 44 [kWh/Nm^3] [49].



Fuente: Departamento de Energía de EE.UU. y Wood Mackenzie.

Figura 3.3.8 “Electrolizador del tipo alcalino”

Fuente: IdeaGreen, Hidrógeno verde y sus tipos de electrolizadores.

Para el caso de los **Electrolizadores PEM**, su eficiencia llega hasta un 80% en condiciones de presión con 30 [bar], para el caso de un PEM de solo 1 MW se puede obtener 207 [Nm^3/h] de H_2 consumiendo solo 4.53 [kWh/Nm^3] de energía.

El último caso es el de los **electrolizadores de estado sólido**, en donde como se mencionó anteriormente, su eficiencia es de un 100%, teniendo una capacidad de aproximadamente 100 kW [2].

3.4 El Hidrógeno verde en Chile

Debido a la enorme riqueza que tenemos como país en el área de las energías renovables, Chile tiene el potencial de ser uno de los más grandes productores de Hidrógeno Verde a nivel mundial.

Con una estimación de concentración solar de potencia de 509 GW, solar fotovoltaica de 1180 GW, eólica de 191 GW e Hidroeléctrica con 6 GW. El potencial energético renovable como país fluctúa entre los 1800 GW aproximadamente, lo que equivale a 70 veces la demanda consumida como país.

En los últimos años, el país ha tenido un gran crecimiento con respecto a estas fuentes energéticas, por lo que se espera para el año 2013, un 70% de uso de energías renovables.

Según las estimaciones realizadas por el Ministerio de energía de nuestro país se espera que de aquí al año 2050 el H2V como tal, contribuya a reducir entre el 25-27% de emisiones por año [32].

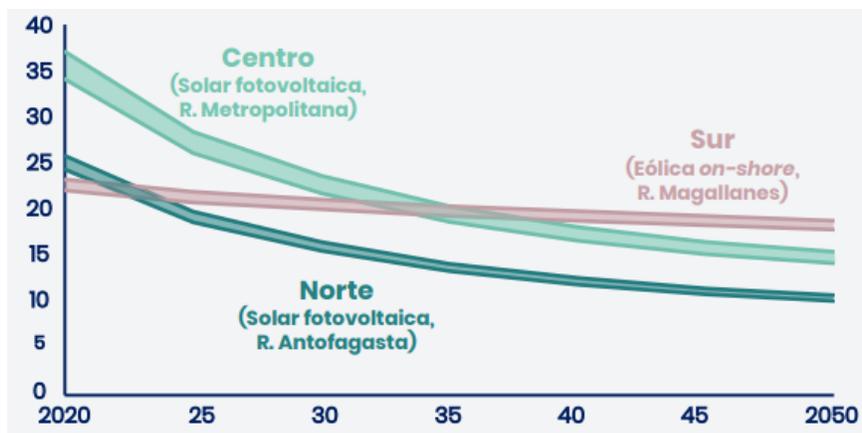


Figura 3.4.1 “Gráfica de costos nivelados de electricidad renovable (USD/MWh)”

Fuente: Estrategia nacional del Hidrógeno verde en Chile, Gobierno de Chile

El potencial renovable de Chile podría permitir la producción de cobre verde, además de otras exportaciones para así bajar las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. En el país, se tiene estimado que hasta un 25% aproximadamente de las emisiones de CO₂ podrían ser mitigadas con el uso de H2V al año 2050.

Chile es el primer país en Sudamérica en presentar un plan estratégico acerca del hidrógeno verde, éste pretende posicionar de aquí al año 2040 a nuestro país como una de las tres grandes potencias a nivel mundial con respecto a la exportación de esta materia.

Se debe recalcar que, como país en la zona norte encontramos la radiación solar más alta del planeta. En la zona central la generación solar es más competitiva que la generación eléctrica con energía fósil. Mientras que en la zona Sur los vientos soplan con la misma energía tanto en tierra como en mar adentro [44].

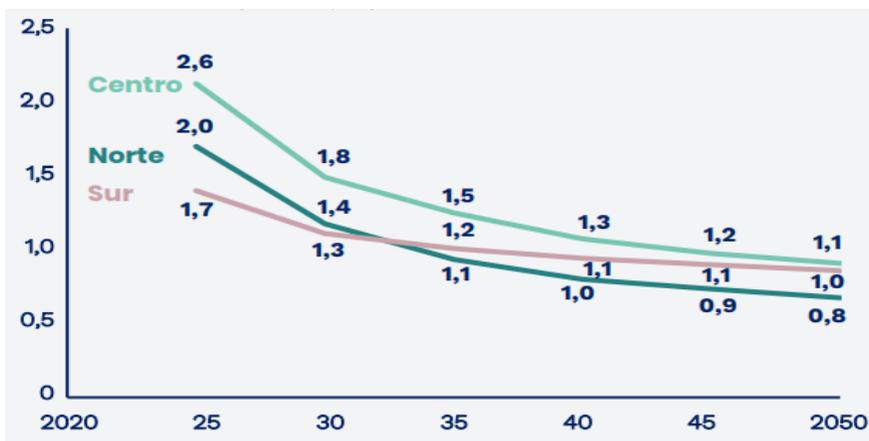


Figura 3.4.2 “Gráfica de costos nivelados de Hidrógeno verde en Chile (USD/kgH₂)”

Fuente: Estrategia nacional del Hidrógeno verde en Chile, Gobierno de Chile.

El hidrógeno verde tiene un rol fundamental en aquellos sectores productivos en los que la cantidad de emisiones de CO₂ al medio ambiente son muy altas, como son la industria minera y el transporte pesado en nuestro País. También así en sectores en dónde la energía eléctrica como tal es difícil de acceder o de un costo más elevado.

Chile tiene la oportunidad de ser un líder con respecto al Hidrógeno verde, pudiendo cambiar así con el estigma de ser un país históricamente basado en recursos no renovables a ser un exportador de ésta y también así ayudar drásticamente a la descarbonización mundial [35].

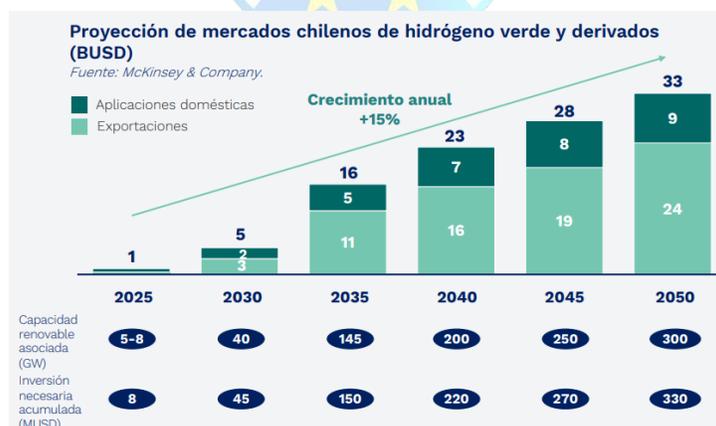


Figura 3.4.3 “Gráfica de crecimiento con respecto al mercado de Hidrógeno verde y derivados En Chile”

Fuente: Estrategia nacional del Hidrógeno verde en Chile, Gobierno de Chile.

El potencial renovable que se tiene como país permitiría la producción de cobre verde, energéticos limpios y otras exportaciones con poca presencia de CO₂, para así contrarrestar con los efectos de gases invernadero, brindando una alternativa al recambio del Diesel.

Se busca realizar una orientación de forma positiva para que así el país pueda lograr un mejor desarrollo para esta industria, por lo que se ha generado la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en Chile. En este plan se proponen los pasos para llegar a lograr llevar a cabo dicha estrategia y se establecen también metas que propulsarían a ser líderes en este ámbito. Dentro de sus principales metas, se encuentran:

- Convertirse para el 2030, en el principal y más barato productor de Hidrógeno Verde a nivel mundial.
- Ser el productor más barato de este recurso y contar con 5 GW de capacidad de electrólisis hasta el 2025.

Para el año 2050 se podrían producir cerca de 160 millones de toneladas de H₂V anualmente, tomando en consideración tanto las exportaciones como el uso nacional, esto significaría un tamaño de mercado de 33 billones de dólares, lo cual es muy similar a lo que representa toda la economía con respecto al cobre para el país en la actualidad [50].

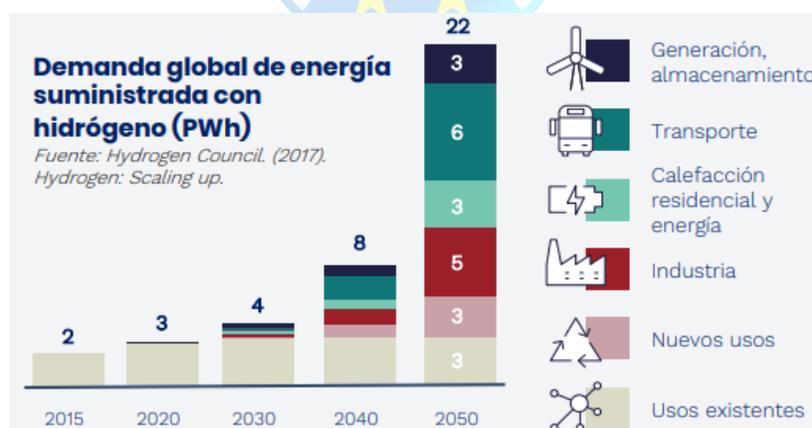


Figura 3.4.4 “Gráfica de la demanda global del Hidrógeno (PWh)”

Fuente: Estrategia nacional del Hidrógeno verde en Chile, Gobierno de Chile

El Hidrógeno Verde en el país suma tanta relevancia que se estima que podría llegar incluso a desechar el litio como tal, acaparando gran parte del mercado energético a futuro. La Comisión de Ciencia e Innovación, Desafíos del Futuro y Comisión de Minería y Energía, además del Senado de la República (2021), pronuncian lo siguiente:” la demanda mundial de cobre y litio está aumentando de forma sostenida por la transición energética y la electromovilidad, y se requerirán minerales con baja huella de carbono. Chile tiene una posición privilegiada para capturar parte importante de ese mercado por sus niveles de radiación solar y la posibilidad de generar hidrógeno verde competitivo” [51].

Tabla 3.4.1 “Estimaciones mencionadas dentro de la estrategia nacional del Hidrógeno verde”

Estimaciones Nacionales mencionadas dentro de la estrategia	2030	2050
Tamaño Exportación Chilena	\$3.000 millones USD/año	\$24.000 millones USD/año
Tamaño Mercado interno Chileno	\$2.000 millones USD/año	\$9.000 millones USD/año
Inversión Necesaria Acumulada	45 millones USD	330 millones USD
Capacidad de generación renovable asociada	40 GW	300 GW
Empleos	22.000	91.000
Emisiones GEI (Gases Efecto Invernadero)	n/m	Hasta un 25% de ahorro en emisiones

Fuente: “Estrategia Nacional del Hidrógeno Verde en Chile, Gobierno de Chile

Tabla 3.4.2 “Metas en la estrategia nacional del Hidrógeno verde”

Metas estrategia nacional del hidrógeno verde	2030	2050
Capacidad de electrólisis construida y en desarrollo	5 GW	25 GW
Otros	Producir 200 mil toneladas de hidrógeno verde al año, lograr inversiones de 5 mil millones de dólares para la fecha.	Producir el hidrógeno verde más barato del mundo (menos de 1.5 USD/kg), y exportar 2.5 mil millones de dólares en hidrógeno verde y derivados de este.

Fuente: Estrategia nacional del Hidrógeno verde en Chile, Gobierno de Chile

Tabla 3.4.3: “Comparativa del H₂ y otros combustibles, costos y eficiencia”

PROCESO	EFICIENCIA (%)	DISPONIBILIDAD	CENTRALIZADA /DESCENTRALIZADA	EMISIONES CO ₂	PRECIO EN EURO
Gas Natural (SMR sin CCS)	70-75	Ya disponible	Ambas	288-292	0.07-0.1
Gas Natural (SMR con CCS)	60	Medio plazo	Centralizada	427	0.09-0.15
Gasificación carbón (sin CCS)	50-60	Ya disponible	Centralizada	659	0.07
Gasificación carbón (con CCS)	40-50	Medio plazo	Centralizada	20.3	0.08
Gasificación Biomasa	56	Medio plazo	Descentralizada (cerca del recurso)	0	0.07-0.08
Electrolisis (con eólica)	65-70	Corto plazo	Ambas	0	0.11-0.15
Electrolisis (con red eléctrica)	30	Ya disponible	Descentralizada	440	0.2
Ciclos termoquímicos (Energía Solar)	30	Largo plazo	Centralizada	0	0.18
Ciclos termoquímicos (Energía Nuclear)	30	Largo plazo	Centralizada	0	0.06

Fuente: Universidad de Girona “Estudio del H₂ y otros combustibles”, Elaboración propia

3.4.1 ¿Por qué ahora?

Si hacemos una retroalimentación y nos preguntamos por qué ahora y no antes, debemos mencionar primeramente al factor clave en todo esto, el Calentamiento Global.

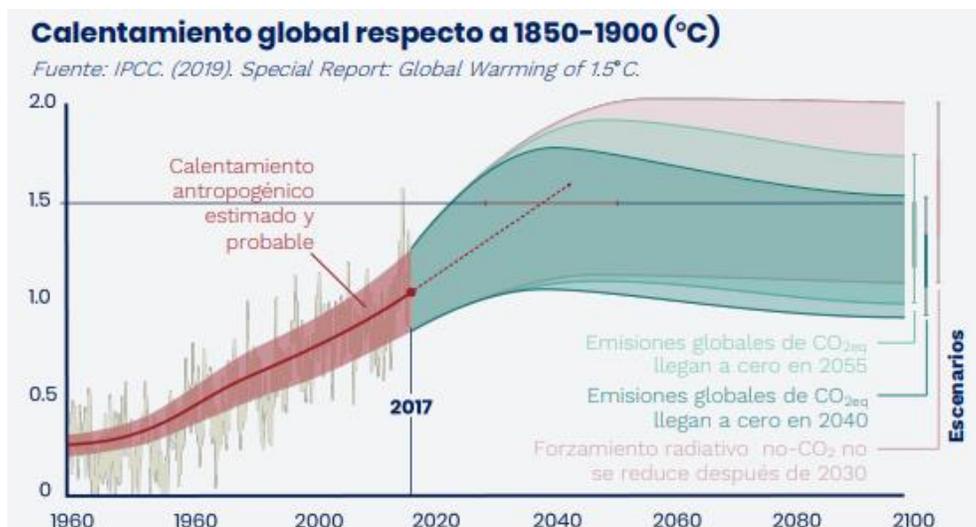


Figura 3.4.5 “Calentamiento Global respecto años 1960-2100”

Fuente: Estrategia nacional del Hidrógeno verde en Chile, Gobierno de Chile

Dicha gráfica nos revela la rapidez y crecimiento casi exponencial que repercute el calentamiento global con el pasar de los años.

Por otro lado, se tienen las limitaciones que efectúan las emisiones de carbono con respecto a los costos y estrategias internacionales, lo que presentaría un escenario favorable a la hora de acelerar el desarrollo del Hidrógeno Verde como país.

También se espera que surja una reactivación económica con el medioambiente en el desarrollo de esta industria.

Actualmente en nuestro país el Hidrógeno (mayoritariamente azul) se produce en dos empresas y se utiliza principalmente en refinerías de petróleo, en la industria alimentaria, por ejemplo, para la fabricación del aceite y en procesos especiales de refrigeración y de tratamientos térmicos [52].

El gobierno afirma que este elemento será fundamental en 3 áreas.

Cambio climático: Será clave para cumplir las metas ambientales incluyendo la NDC y las metas de carbono con neutralidad al 2050.

Oportunidades sociales: Se espera que esta industria pueda promover el capital humano y ayudar en la reducción de contaminación local y activación de ecosistemas en desarrollo.

Economía: Chile no es productor de combustibles fósiles, esto quiere decir que todo el diésel que ingresa a nuestro país se adquiere importándolo, pagando así un costo elevado debido a la escasez de este recurso, como también así los gastos de su transporte, por ende, no es rentable el diésel. Chile debe mirar con positivismo y afianzarse hacia la independencia energética, ya que no solo será de gran ayuda en el ámbito climático y ambiental, sino que también mejorará notoriamente la economía e intermitencia energética en la Isla, obteniendo así la creación de más empleos, y zonas de inversión en regiones más descentralizadas.

Como se ha mencionado anteriormente, éste a su vez nos ofrece una gran oportunidad y alternativa para diversificar la matriz energética. En el área vehicular posee una gran ventaja con respecto a su consumo energético en comparación con otros combustibles fósiles [32].

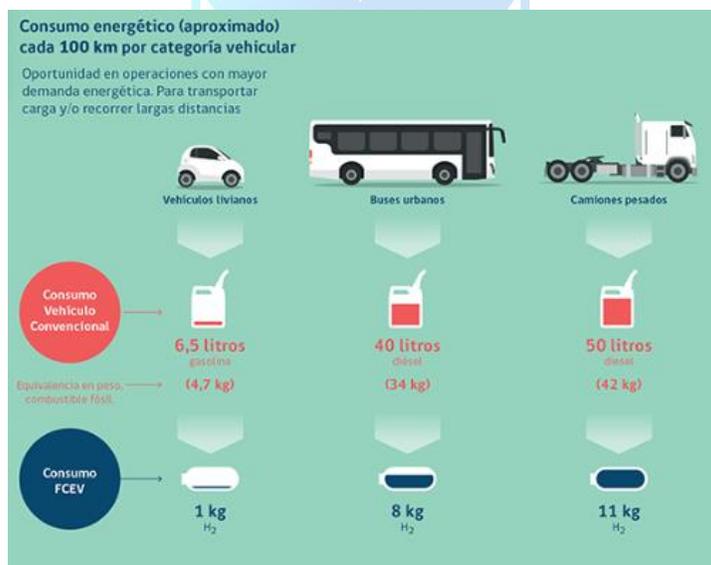


Figura 3.4.6 “Consumo energético aproximado por cada 100 km en el área vehicular”

Fuente: Energia.Gob.cl “Electromovilidad con Hidrógeno”

3.4.2 Aplicaciones

Las aplicaciones del Hidrógeno Verde se pueden apreciar en diversas áreas, tanto minera como agrícola, alimentaria, petrolera o de exportación (transporte).

Recordemos que el H₂V puede utilizarse como fuente energética para fabricar productos limpios, en la industria petroquímica se utiliza para la refinación de combustibles fósiles, en la producción de amoníaco, en la industria acerera, de agricultura, en el transporte de maquinaria pesada, minería, entre otros [35].

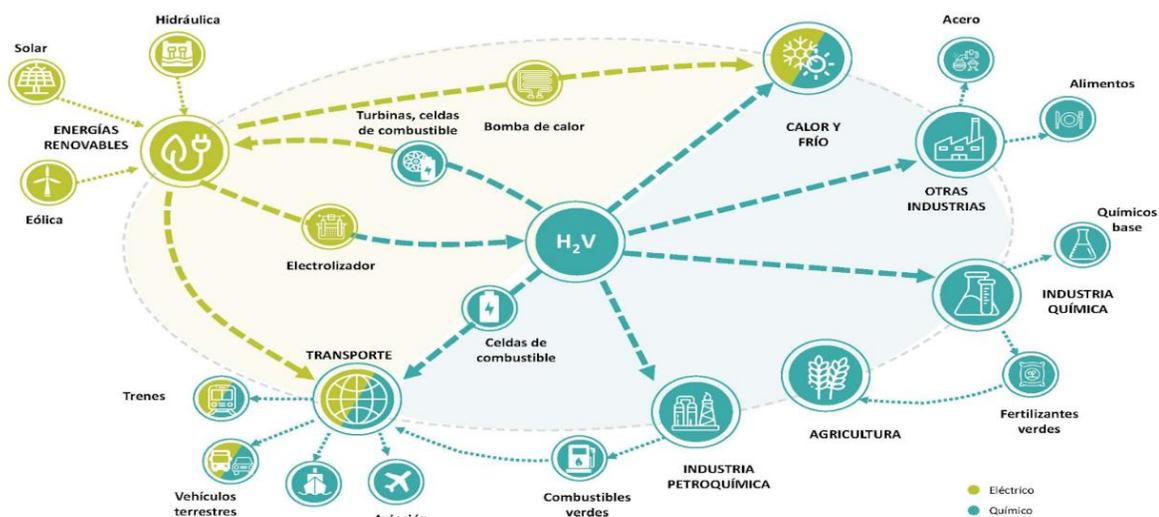


Figura 3.4.7 “Diversas aplicaciones para el uso de Hidrógeno verde en Chile”

Fuente: Nueva estrategia del Hidrógeno verde en Chile Gobierno de Chile

Actualmente se están desarrollando dispositivos llamados celdas de combustible, en las cuales el hidrógeno se quema en forma directa generando electricidad.

Hoy en día existen medios de transporte con celdas de combustible y estanques de hidrógeno para su mejor funcionamiento y ecología.

También se puede usar en el almacenamiento en la generación de electricidad a través de turbinas en procesos acereros como la refinación de metales, la producción de fertilizantes para la agricultura y en el área de la minería utilizando así amoníaco verde como materia prima [53].

3.5 Celdas de combustible

Son las encargadas de llevar a cabo el proceso electroquímico de conversión de energía, en donde ingresa el H₂ previamente almacenado en los estanques y se oxida para combinarse con el O₂ proveniente del aire, para así generar electricidad, calor y vapor de agua [54].

3.5.1 Introducción

Estas fueron basadas en el proceso inverso al de la electrólisis y fue descubierto de forma accidental por Sir William Grove en el año 1839, mientras efectuaba experimentos sobre la electrólisis del agua para producir hidrógeno y oxígeno. Así fue como Grove descubrió que era posible revertir el proceso generando electricidad al recombinar estos elementos para la producción de agua [55].

Las celdas de combustible son un dispositivo electroquímico de conversión de energía parecido a una batería, en el que el flujo de combustible y de oxidante sufren una reacción química controlada, la cual tiene como efecto la producción de corriente eléctrica a un circuito externo.

Su gran diferencia en relación con una batería radica en que esta está diseñada para el suministro continuo de sus reactivos, esto quiere decir que produce electricidad mediante una fuente externa. En cambio, el caso es contrario en las baterías, quienes poseen un límite de almacenamiento de su energía, además de que sus electrodos cambian de polaridad dependiendo si está cargada o descargada, mientras que las celdas de combustible al poseer electrodos de tipo catalíticos son más estables [54].

Así su primera gran aplicación práctica fue en 1959 al ser instaurada en un tractor, mientras que la aplicación más importante llegó en 1963 junto a la era espacial. Se estima que de aquí al año 2050 se logren comercializar pilas que alcanzarán alrededor de los 50 GW [56].

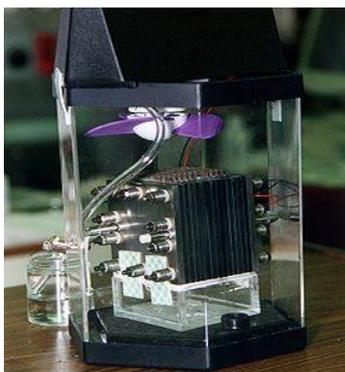


Figura 3.5.1 “Pila de combustible de metanol directo”

Fuente: "Fuel Cell Basics: Applications" Wayback Machine. Fuel Cells 2000

Las celdas de combustible producirán energía en forma de electricidad y calor mientras se le provea de “combustible” para su funcionamiento y el único subproducto que se genera es agua. Recordemos que para obtener mayor corriente eléctrica podemos colocar muchas celdas juntas.

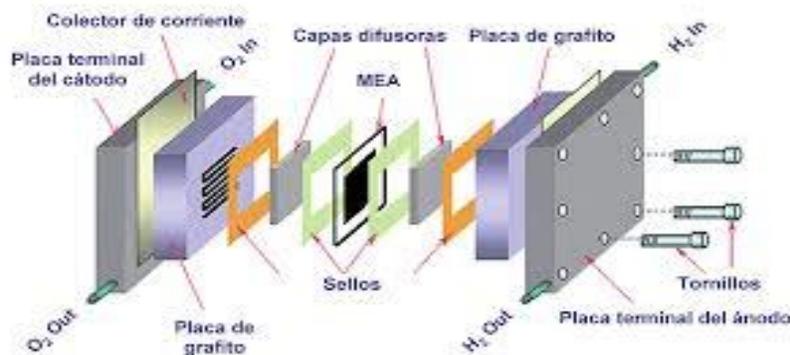


Figura 3.5.2 “Esquema de una pila o celda de combustible del tipo PEM.”

Fuente: Energia2012.es pila de combustible tipo PEM, 2012.

A continuación, se aprecia el apilamiento de las celdas de combustible.

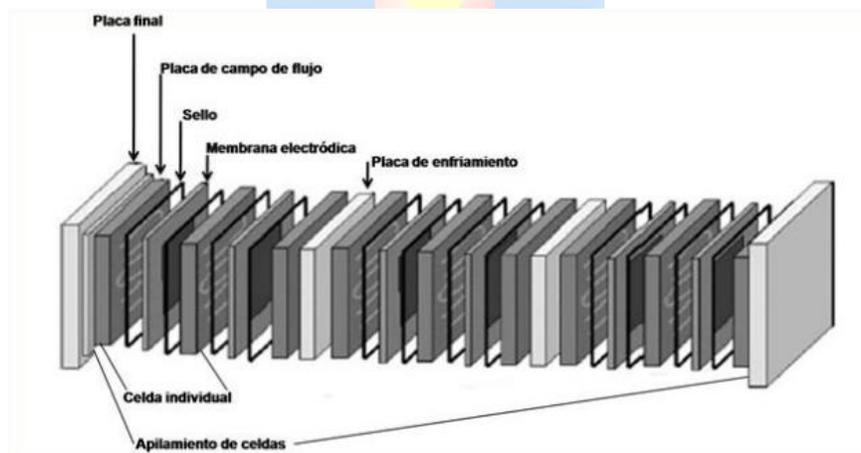


Figura 3.5.3 “Esquema del apilamiento de pilas de combustible”

Fuente: Universidad Nacional autónoma de México, Celdas de combustible como elementos potenciadores para un desarrollo energético sustentable.

3.5.2 Funcionamiento de las celdas de combustible

El funcionamiento de una celda de combustible básicamente consiste en la oxidación del Hidrógeno en agua produciendo energía eléctrica y calor directamente, sin la necesidad de pasar por generadores u otros artefactos [54].

Como hemos mencionado anteriormente, una celda o pila de combustible está formada por un ánodo, un cátodo y electrolitos. Dentro de la celda se presenta una reacción química REDOX, de la cual se obtendrá la electricidad calor y agua.

Esto se logra inyectando Hidrógeno por el ánodo, el cual será ayudado por una cubierta de platino que quitará los electrones de éste, dejándolo así ionizado, o sea en forma de protones (H^+). La membrana electrolítica o electrolizador, separará ambos componentes y permitirá solo el paso de protones hacia el cátodo. Como los electrones que quedaron separados no logran pasar por el cátodo, son forzados a circular por un circuito externo en forma de corriente eléctrica. Por otro lado, el oxígeno inyectado en el cátodo fluye, siendo así combinado con los protones y electrones para formar así agua, cuando esto sucede también se libera energía en forma de calor, siendo así una reacción exotérmica. Esta reacción ocurre dentro de la celda, y la producción de agua estará formada en distintas partes de esta, dependiendo que electrolito se utilice [57].

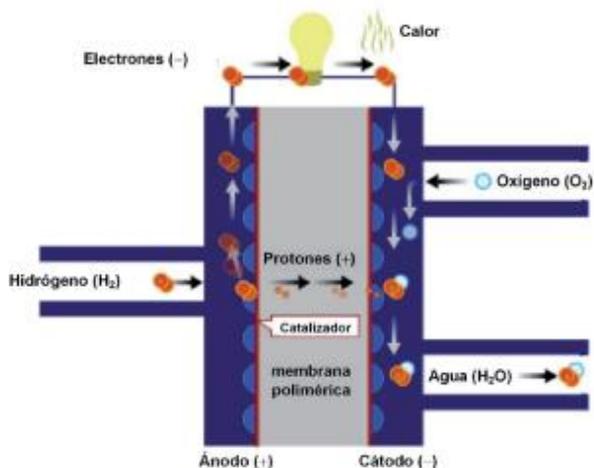


Figura 3.5.4 “Esquema simplificado del funcionamiento de una pila de combustible”

Fuente: Apilados.com, como funciona una pila de combustible y sus limitaciones

Como punto aparte es necesario recalcar que las pilas de combustible necesitan de un sistema de ventilación para su óptimo funcionamiento, ya que esto brindará una compensación de presión continua y ventilación adecuada al tiempo, lo cual evitará que ingrese agua o algún residuo contaminante. En otras palabras, su objetivo es igualar la presión interna con la ambiental [43].

Actualmente las celdas de combustible surgen como una fuente energética que además de ser novedosa, tiene un gran potencial.

3.5.3 Tipos de Celdas de combustible

Las pilas o celdas de combustible se clasifican según el tipo de electrólito que utilizan. Las principales diferencias entre estas son las temperaturas a las que operan y la pureza del combustible que utilice, como también los rendimientos y usos que se les dé [70].

Las principales pilas de combustible son 6, las Alcalinas, de Membrana de Intercambio, de Metanol Directo, de Ácido Fosfórico, de Carbonato Fundido, de Óxido Sólido [58].

Tabla 3.5.1 “Principales Tipos de celdas de combustible y sus diferencias”

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolito	Membrana de Polímero Sólido	Solución Alcalina	Ácido Fosfórico	Carbonatos Fundidos	Óxido Sólido	Membrana de Polímero Sólido
Temperatura Operación (°C)	60 - 80	100 - 120	200 - 250	600 - 700	800 - 1000	50 - 120
Rango potencia	5 - 250 kW	5 - 150 kW	50 kW - 11 MW	100 kW - 2 MW	100 - 250 kW	5 kW
Ventajas	Baja Temperatura Arranque rápido Baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida	Acepta H2 impuro	Reformado interno Cogeneración	Reformado interno Cogeneración	No necesita reformador de combustible
Aplicaciones	Transporte Portátiles Residencial	Espaciales	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor	Portátiles

Fuente: Centro nacional del Hidrógeno, Cnh2.es/pilas de combustible

A continuación, se aprecia una tabla diferenciando todas las pilas de combustible.

Tabla 3.5.2 “Tipos de pilas de combustible y sus características técnicas”

Tipo de pila de combustible	Electrolito	Potencia eléctrica (W)	Temperatura de trabajo (°C)	Eficiencia de la pila (%)	Eficiencia del sistema (%)	Estado
Pila de combustible de hidruros metálicos	solución acuosa alcalina		-20			Comercial / investigación
Pila de combustible electrogalvánica	solución acuosa alcalina		>40			Comercial / investigación
Pila de combustible de ácido fórmico	membrana polimérica (ionómero)	< 50 W	< 40			Comercial / investigación
Batería de zinc-aire	solución acuosa alcalina		<40			Producción en masa
Pila de combustible microbiana	Membrana de polímero o ácido húmico		<40			investigación
Pila de combustible regenerativa	membrana polimérica (ionómero)		<50			Comercial / investigación
Pila de combustible borohidruro	solución acuosa alcalina		70			Comercial / investigación
Pila de combustible de metanol reformado	membrana polimérica (ionómero)	5 W – 100 kW	125-300	50–60	25–40	Comercial / investigación
Pila de combustible de etanol	membrana polimérica (ionómero)	< 140 mW/cm ²	> 25			investigación
Pila de combustible REDOX	electrolitos líquidos y membrana polimérica (ionómero)	1 kW – 10 MW				investigación
Pila de combustible cerámica protónica	conductor de H ⁺ de óxido cerámico					investigación
Pila de combustible de carbono	varios diferentes		700–850	80	70	Comercial / investigación
Bio-pilas de combustible enzimáticas	cualquiera que no desnaturalice la enzima		<40			investigación
Pila de combustible de magnesio-aire	agua salada		(-20)-555	90		Comercial / investigación

Fuente: "Types of Fuel Cells". Department of Energy EERE website, accessed 4 August 2011



3.5.4 Aplicaciones de las Celdas

Uno de los campos donde se empieza a implementar es en el **transporte**, ya que son capaces de producir un funcionamiento limpio, silencioso y eficiente en autos, superando así también en autonomía a los autos eléctricos y de combustible. Marcas como Ford, General Motors, Toyota, entre otras, ya ensayan con prototipos para su pronta comercialización, a su vez se están estudiando para la utilización como auxiliares de potencia [34].



Figura 3.5.5 “Transporte, particularmente de maquinaria pesada, utilizando módulos de celdas de combustible, El futuro del transporte”

Fuente: Plataforma de electromovilidad, energía.gob.cl

A su vez también brinda **aplicaciones portátiles**, como punto importante tenemos el tamaño de estas, el uso de una pequeña pila de combustible como fuente energética para pequeños dispositivos electrónicos, en lugar de las tradicionales baterías nos ofrecerá más autonomía en los equipos.



Figura 3.5.6 “Notebook Toshiba, utilizando pilas de combustible, anunciado para su próxima venta el año 2023”

Fuente: BBC News

En el **área residencial** esta también llega a tener mucho énfasis, ya que el hecho que estas desprendan calor durante su funcionamiento, además del tamaño y velocidad de escalado, las hacen perfectas para darles un uso domiciliario, en donde brindaría a cada hogar tanto calefacción (calor) como también electricidad [45].

Aplicaciones de generación eléctrica, los avances exponenciales con respecto a esta tecnología nos permitirán la producción a gran escala de energía eléctrica, además el uso de

las pilas de combustible de alta temperatura nos ayudará a aprovechar mejor el calor residual generado, para así mezclarlo con alguna otra tecnología y mejorar el rendimiento global.

Las celdas de Hidrógeno hoy en día están siendo utilizadas en el uso de automóviles, botes, buses, aviones, submarinos, maquinaria pesada, etc.

Actualmente Estados Unidos ya cuenta con más de 85 estaciones de rellenado de celdas de Hidrógeno [59].



Figura 3.5.7 “Celda de combustible de ácido fosfórico (Genera 200kW de electricidad y 200kW de energía térmica)”

Fuente: Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Capítulo 1, Segunda Edición, Wiley (2003)

3.6 Evaluación Planta Productora de Hidrógeno

Gracias al desarrollo de los paneles FV y otras tecnologías, en la actualidad se puede producir suficiente energía eléctrica como para abastecer a una isla sin problemas y lograr solventar los problemas energéticos que existen en ella. En la actualidad, existen el mercado, variados electrolizadores, portátiles y con las especificaciones técnicas adecuadas para la producción de H_2 en lugares aislados como en este caso.

Aproximadamente 1 kg de Hidrógeno equivale a 6.5 litros de gasolina (4,7 kg), mientras que 8 kg a 50 litros de diésel (42 kg).

Para el caso del funcionamiento de una planta de producción de H_2 se puede dividir en las siguientes áreas:

Debe existir un **estanque de Agua** que alimenta el electrolizador, el agua puede provenir del mar, siempre y cuando esté sin sales disueltas (desalinizada). A su vez también el **área de acceso a electricidad** proveniente de fuentes renovables y de bajo costo, estas son dirigidas hacia el **área de electrolización**, en donde como referencia, por cada 10 litros aproximadamente se produce 1 kg de H₂.

Por último, su producto es trasladado al área de almacenamiento, (ya sea de O₂ o H₂ respectivamente) para ser envasado en tanques con capacidades hasta los 1000 kg y posteriormente distribuido [21].

En este caso lo más factible es almacenarlo de manera gaseosa, ya que el método líquido es más conveniente utilizarlo cuando se necesita transportar a largas distancias.

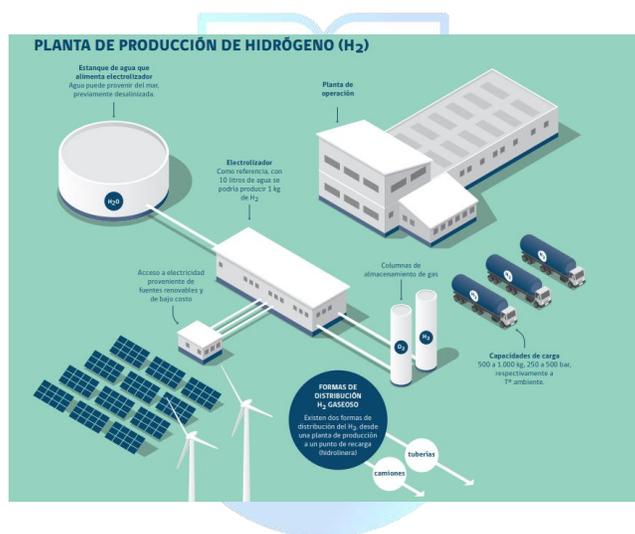


Figura 3.6.1 “Diagrama de áreas y funcionamiento de una planta generadora de H₂”

Fuente: Energia.Gob.cl “Electromovilidad con Hidrógeno”

Con lo ya antes mencionado, primeramente, se deben calcular los respectivos gastos económicos y consumo energético total para la producción del H₂ (cantidad de Hidrógeno que se debe generar).

Obtenidos los respectivos cálculos de consumo, es fácil acertar en la cantidad aproximada de agua a utilizar en la planta, sin generar mayores pérdidas asociadas (8-12 litros de agua son capaces de generar 1 kg de Hidrógeno).

3.7 Costos de Producción teóricos

Con respecto a sus costos, este dependerá de la fuente de energía renovable utilizada, el costo de inversión del electrolizador y sus horas de funcionamiento.

Para la producción de 1 kg de Hidrógeno mediante la electrólisis se necesitan alrededor de 50-60 [kWh] de energía eléctrica.

Si se toma en cuenta como referencia que el costo de energías renovables va desde los 50-60 dólares aproximadamente por MWh, y que el costo de los materiales para electrólisis varía de 3-5 dólares por kg de Hidrógeno producido, gastos en la licuefacción (1.6 dólares por kg) o la compresión (0.3-0.5 dólares por kg). Sumado también los gastos de transporte, que bordea de 1 a 3 US por kg de H₂.

Con todo lo antes mencionado, actualmente el valor del H₂ verde está entre los 7-9 dólares por kg. Para que el H₂ verde pueda competir en el mercado de los combustibles fósiles, es necesario que el valor de los electrolizadores descienda y que el precio de la energía eléctrica varíe de 20 a 30 dólares por MW/h [45].

Se espera que de aquí al 2030 el precio del H₂V sea cada vez más bajo, gracias a las políticas cero emisiones, la baja del precio en las energías renovables y electrolizadores y las mejoras en su eficiencia para así entrar a competir con los otros combustibles en Chile [60].

Tabla 3.7.1 “Tabla comparativa costo actual de los diferentes combustibles”

Combustible	Poder calorífico superior	Precio	Precio para 1 MMBTU	Eficiencia	Precio del H ₂ para competir
	[Kcal/kg]	[US\$/kg]	[US\$/MMBTU]	[%]	[\$/kg]
Gas natural	13100	0.64	13	80	1.76
LPG	11082	0.63	13.2	79	1.8
Diesel	10900	0.82	19	85	2.2
carbón	7000	0.29	10.4	80	1.4
FO5	10300	0.46	11.3	83	1.6
FO6	10300	0.46	11.3	83	1.6

Pellets	4300	0.19	11	80	1.5
Chips	2350	0.072	11	70	1
PDM	3068	0.062	5.1	57.8	0.75
H2V	33916	8	59	75	-

Fuente: Elaboración propia

3.8 Conclusión

Las celdas de combustible se consideran una de las alternativas más eficientes para la obtención de energía, debido a que la generación eléctrica es directa la eficiencia que puede alcanzar una pila es muy elevada, además de la electricidad, nos da la oportunidad de poder recuperar el calor, superando así por lejos a otros sistemas convencionales. Una ventaja muy favorable también es que, al no tener ninguna parte de su sistema en movimiento, es muy silenciosa. Al no usar combustión para la respectiva generación de energía, lo hará prácticamente libre de contaminación, o sea que la energía será 100% limpia.

El combustible más conveniente en la actualidad vendría siendo el Hidrógeno, ya que es el que más energía por unidad de masa logra entregar (141MJ/kg). Además de obtenerse fácilmente por la electrólisis. Otro punto de gran relevancia es su economía, el precio de las pilas de combustible es bajo, comparado con los gastos anuales en luz y gas, y con respecto a los costos de mantención estos casi no la necesitan.

Con todo lo mencionado anteriormente, se puede decir que la instalación de uso de celdas de combustible nos da paso a una independencia energética, ya que daría paso a un mercado de electricidad muy distinto al que conocemos hoy en día (habría más oferta y demanda).

CAPÍTULO 4. ISLA MOCHA Y SUS CONDICIONES CLIMÁTICAS

4.1 Introducción

La Isla Mocha se encuentra ubicada en costas chilenas frente al litoral de la provincia de Arauco, a 34 kilómetros de la ciudad de Tirúa. Esta isla depende administrativamente de la ciudad de Lebu, Región del Biobío. Se encuentra geográficamente ubicada a "38°23'06 latitud sur y 73°52'00 longitud oeste" [61]. Esta posee actualmente un suministro eléctrico mediante un sistema eléctrico aislado mediante el uso de diésel [62]. Unos de los puntos a favor de que se posea un sistema aislado es la autonomía en materia de generación, transporte y distribución.

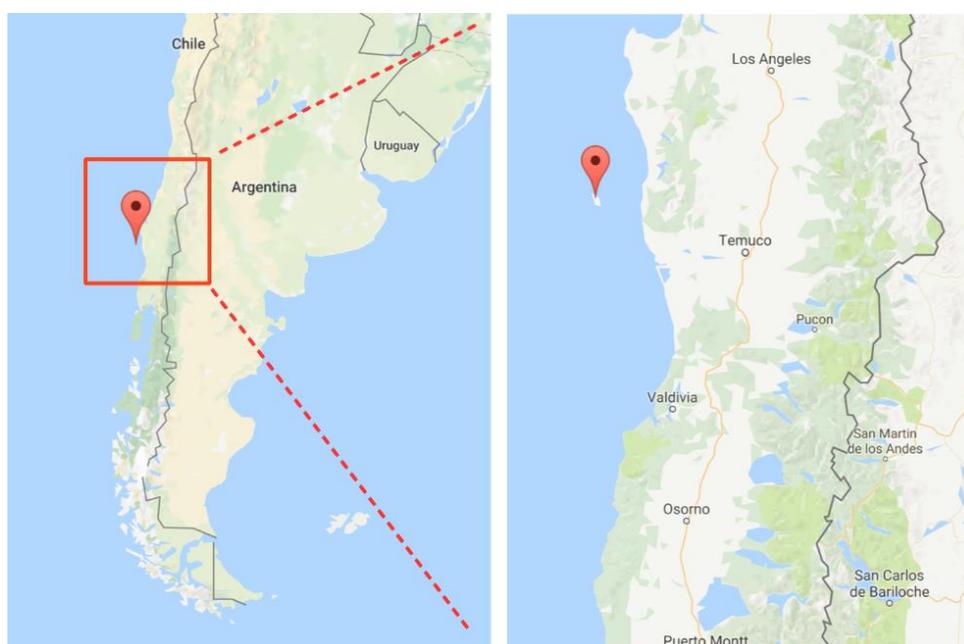


Figura 4.1.1 “Mapa ubicación Isla Mocha”

Fuente: http://curioseandando.blogspot.com/2017/08/cosas-curiosas-de-chile-isla-mocha_6.html

El fin de este trabajo de título es encontrar una forma limpia y sustentable de suministrar energía eléctrica a la Isla, de acuerdo con las condiciones climáticas, tales como la potencia solar y el consumo que estos tienen actualmente.

4.2 Sistema eléctrico de la Isla

Según antecedentes del Ministerio de Energía publicados en marzo del 2019, la Isla cuenta con 257 clientes de estos son 247 residenciales y 10 no residenciales (posta de salud, escuela, oficina de armada, entre otros).

Los datos de consumo mensual promedio son de 78 kWh/mes, teniendo un consumo total anual de la isla al año 2017 de 220.181 kWh.

Se tienen además dos redes una de media y otra de baja tensión, que corresponden al potencial eléctrico que puede ser transportado por las instalaciones eléctricas que nos presentan. Para nuestra red de media tensión, tenemos 13,2 kV de 28 km y una red de baja tensión de 380/220 V de 8 km [62].

Tabla 4.2.1 “Mapa ubicación Isla Mocha”

Datos de consumo Isla Mocha	
Consumo total anual	220.181 kWh
Consumo mensual promedio	78 kWh/mes
Red de media tensión	13.2 kV
Red de baja tensión	380/220 V

Fuente: Elaboración propia

Cabe consignar que el sistema eléctrico de Isla Mocha corresponde a un sistema de generación menor a 1.500 kW. El cual fue comunicado a SEC mediante anexo TE1 N° 627645 de fecha 12.12.2011, con 200 kW de generación. Las 245 viviendas inicialmente conectadas al sistema fueron declaradas mediante Anexo TE1 N° 627159 de fecha 12.12.2011 [62].

4.3 Condiciones climáticas de la Isla

El clima es templado durante todo el año, con una temperatura promedio de 12 °C y una tasa pluviométrica anual de 1.350 mm, por lo que se considera una Isla de clima lluvioso [63].

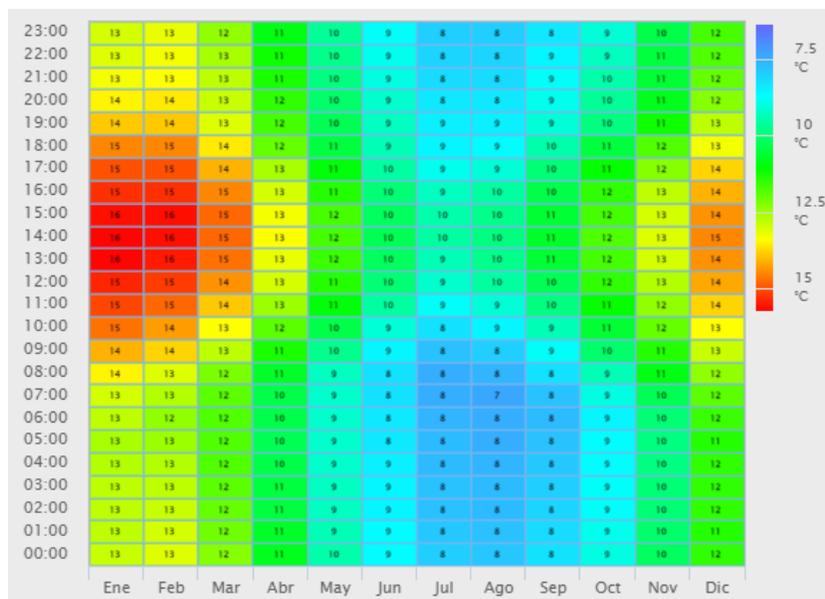


Figura 4.3.1 “Mapa de calor Temperatura- Hora-Mes, Isla Mocha”

Fuente: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>

Con respecto a los índices de radiación solar se ven mucho más altos entre los meses de noviembre a marzo, teniendo un índice anual de radiación directa de $5.23 \left[\frac{kWh}{m^2} / dia \right]$ y difusa horizontal de $1.42 \left[\frac{kWh}{m^2} / dia \right]$ aproximadamente como promedio anual. Esto podemos visualizarlo mediante el explorador del recurso solar.

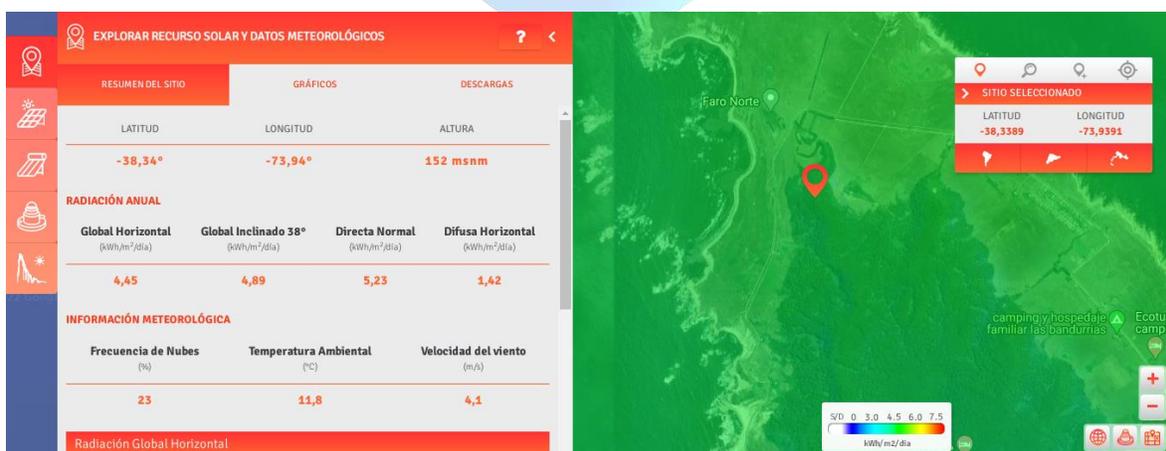


Figura 4.3.2 “Exploración recurso solar y datos meteorológicos”

Fuente: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>

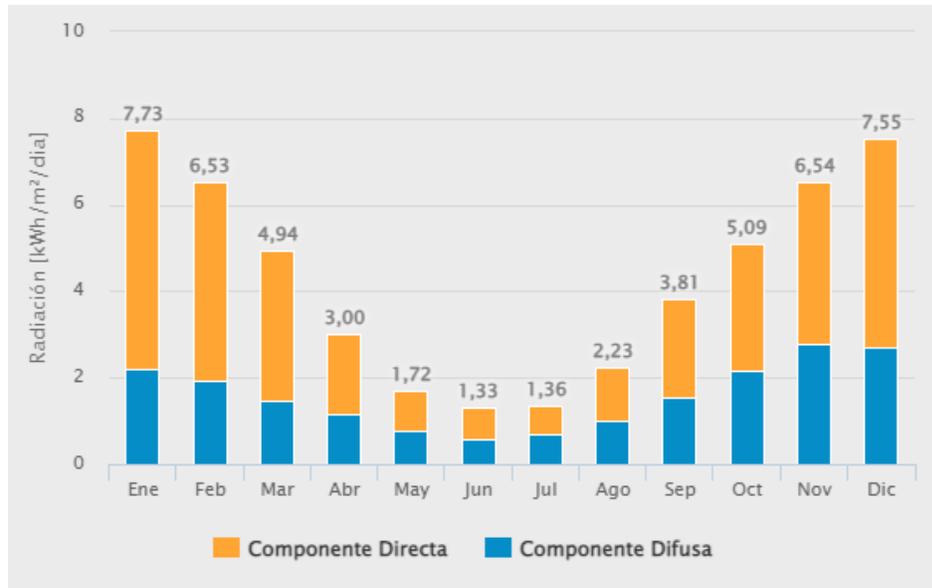


Figura 4.3.3 “Radiación Directa y Difusa”

Fuente: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>

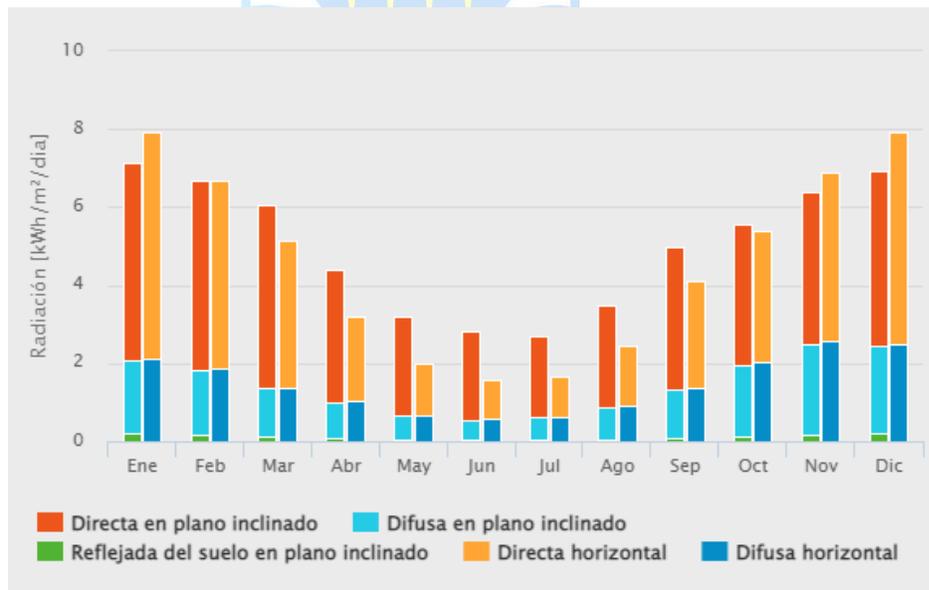


Figura 4.3.4 “Variación anual de la radiación”

Fuente: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>

4.3.2 Problemas de nubosidad de la Isla y cómo esto afecta en el rendimiento de los paneles solares FV

La Isla Mocha se considera de clima lluvioso, por lo que la cantidad de nubosidad se mantiene latente durante gran parte del año, especialmente en los meses de invierno, esto puede conllevar a algunos problemas de eficiencia de los paneles FV, aunque el hecho de que no tenga un clima exageradamente caluroso lo hace un buen candidato para la instalación de estos.

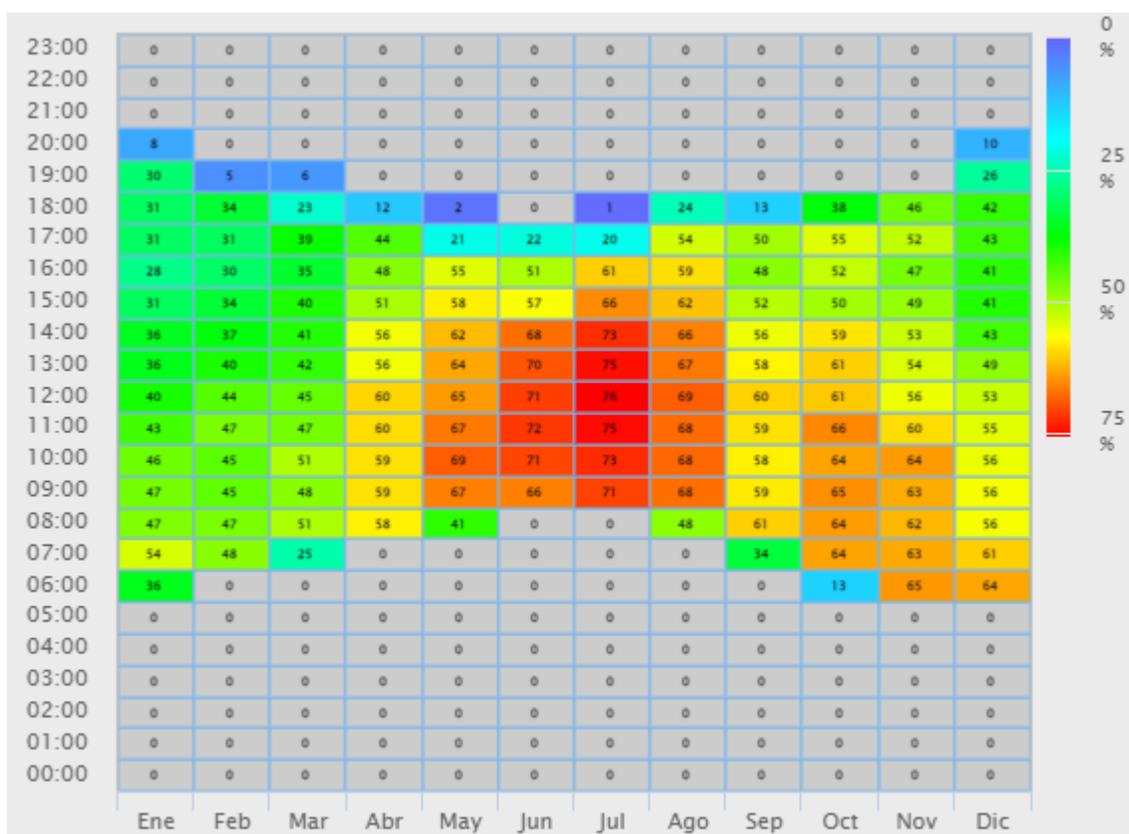


Figura 4.3.5 “Mapa frecuencia de nubes presentes durante mes/hora”

Fuente: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>

En días de nubosidad los paneles solares pueden producir hasta un 90% menos de lo normal dependiendo de las condiciones climáticas, evidentemente la capacidad de producción eléctrica en estos días será inferior a las producidas en condiciones óptimas, ya que existe una limitación con respecto a la radiación solar la cual impide que llegue de forma total a las placas [64].

La energía absorbida por los paneles solares proviene del espectro de luz visible, el cual tiene longitudes de onda que pueden penetrar las nubes sin problema alguno, los rayos del sol no inciden directamente por lo que a esto se le conoce como radiación difusa.

Tomar en cuenta que la potencia de salida de los paneles solares generalmente es de 25°, por lo que cuando existen temperaturas muy altas esos no tienen un rendimiento adecuado, en estos casos las nubes pueden ser de gran ayuda para así regular la exposición solar.

Se sabe que los paneles están compuestos por células solares, las cuales recogen la luz del sol y la convierten en electricidad. Estos paneles tienen un porcentaje de rendimiento con respecto al porcentaje de luz solar recolectado por la placa que posteriormente será convertida en electricidad a lo cual llamamos efecto fotoeléctrico, el rendimiento de estas se ve afectado por las nubosidades por lo que se recomiendan células solares de tamaños considerables y paneles bifaciales, los cuales son capaces de recoger una gran cantidad de radiación diariamente. El rendimiento también se puede ver afectado por componentes de instalación como lo es el inversor.

Para mejorar la eficiencia de nuestros paneles solares en días nublados se pueden ocupar células de mejor rendimiento que existen para estos casos. La Isla Mocha al ser una zona aislada pueden ser muy útiles las baterías o generadores de apoyo para esos días nublados [64].

4.4 Propuesta de posicionamiento paneles solares en la isla

Dadas las condiciones climáticas de la isla, los paneles solares deben ser colocados en lugares estratégicos donde el índice de radiación sea mayor para así obtener la mejor eficiencia posible para la instalación de la granja solar fotovoltaica.

Como propuesta de posicionamiento se tendrán 3 opciones que cumplen con lo siguiente:

- Mayor radiación con respecto a otras zonas de la isla.
- Lugares lo más alejados posibles de las zonas urbanizadas.
- Fuera del área de la Reserva Isla Mocha.

Destacamos las siguientes opciones para la instalación fotovoltaica:

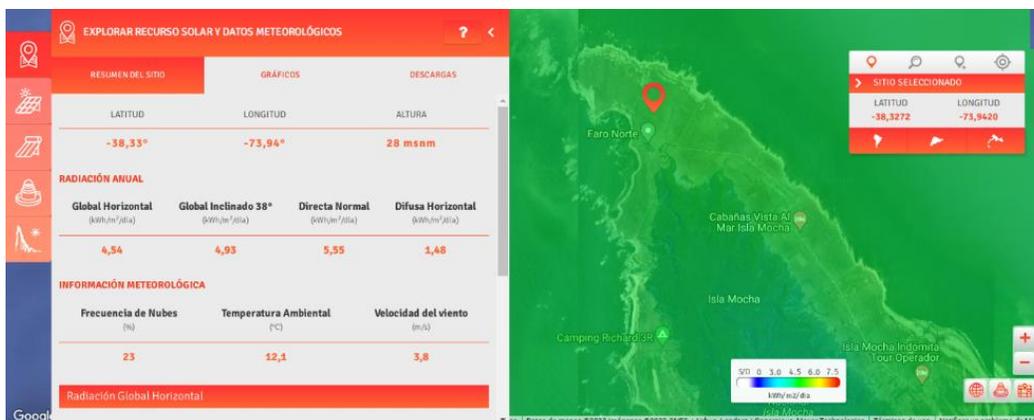


Figura 4.4.1 “Posicionamiento, opción 1”

Fuente: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>

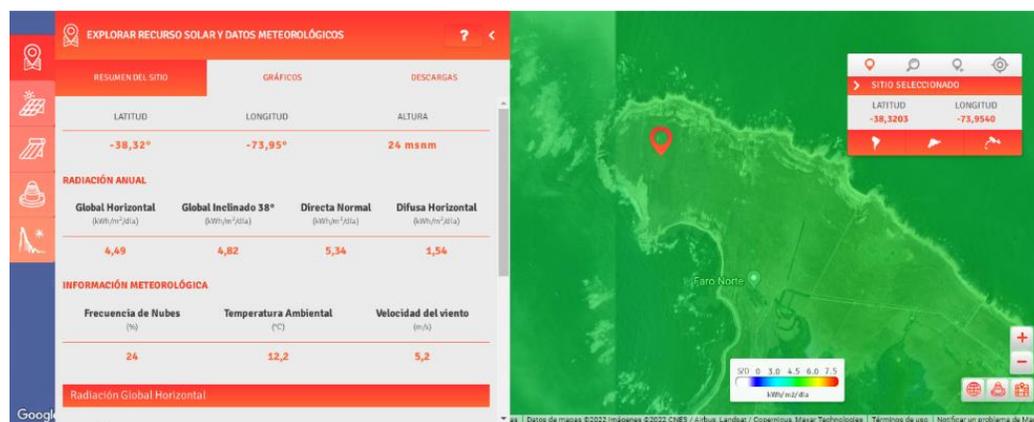


Figura 4.4.2 “Posicionamiento, opción 2”

Fuente: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>

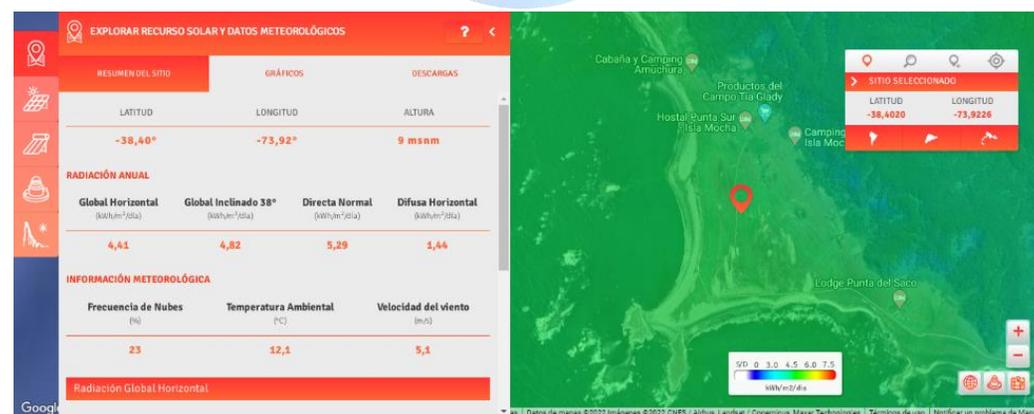


Figura 4.4.3 “Posicionamiento, opción 3”

Fuente: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>

En Google Earth se registraron las zonas de las opciones antes señaladas y se les asignó una región aproximada de superficie que se podría utilizar, tomando en cuenta los criterios primeramente registrados. Estas serán parte de las opciones disponibles para el posicionamiento de nuestros paneles solares y así tener la máxima extracción de energía solar posible.



Figura 4.4.4 “Mapa Isla Mocha para posicionamiento”

Fuente: Google Earth

A gran escala la opción 1 podría ser la mejor opción ya que está más lejos de la orilla del mar, esto permite que sea menos probable las futuras oxidaciones de los materiales con los cuales están compuestos los paneles, pero en si las 3 opciones son bastante viables dada la similitud de la cantidad de radiación solar emitida hacia la zona.

En el país existen varias instalaciones fotovoltaicas, especialmente en la zona norte de nuestro país ya que poseen un posicionamiento privilegiado dada las condiciones climatológicas, se destacan las siguientes:

Tabla 4.4.1 “Potencia de las 10 granjas solares más grandes de Chile”

	Granjas Solares y Región	Potencia Bruta
1	Planta solar “El Romero”, Atacama.	196 MW
2	Planta solar “Bolero”, Antofagasta.	146,64 MW
3	Planta solar “Luz del Norte”, Atacama.	141 MW
4	Planta solar “Finis Terrae”, Antofagasta.	138 MW
5	Planta solar “Conejo solar”, Antofagasta.	104 MW
6	Planta solar “Quilapilún”, Metropolitana.	103,2 MW
7	Planta solar “Amanecer CAP”, Atacama.	101,02 MW
8	Planta solar “El pelícano (En pruebas), Coquimbo.	100,3 MW
9	Planta solar “Carrera Pinto”, Atacama.	73,50 MW
10	Planta solar “Pampa solar norte”, Antofagasta	69,30 MW

Fuente: Energia.gob.cl, Plantas solares más grandes de Chile.

4.5 Principales oportunidades en la Isla Mocha.

Durante todos estos años, los habitantes de la Isla han debido pagar altos costos por la poca e intermitente electricidad a la cuál tienen acceso, se han propuesto diversos proyectos, entre ellos, la construcción de turbinas eólicas, o la creación de costosas tuberías bajo el mar para hacer llegar electricidad mediante cable submarino, etc. pero ninguna se ha llevado a flote.

Actualmente el sistema eléctrico de Isla Mocha abastece a 257 empalmes, la mayor parte del tipo residencial para abastecer de electricidad a alrededor de 700 personas que habitan la isla, siendo la pesca y la agricultura el principal rubro de los habitantes [3].

Si se pudiese utilizar esta energía renovable (solar) para la producción de H₂V en la isla, el H₂ producido mediante la electrólisis podría ser almacenado como gas a alta presión en tanques especiales para ser transportados de una manera más fácil, cómoda, ligera, rápida para así poder energizar cualquier parte de la isla de una manera eficiente.

Una gran oportunidad tiene la isla a la hora de hablar de sus habitantes ya que, al tener una población baja, (hablamos de 700 personas aprox), se facilitaría utilizar el proceso de electrólisis del tipo PEM, ya que como fue mencionado con anterioridad, ésta funciona mejor en plantas de generación de energía más pequeñas y con alta variabilidad energética.

Por ejemplo, si se instalan dos electrolizadores PEM de 1,5 MW en la isla, estos 2 producirán aproximadamente 50 toneladas de hidrógeno cada año a partir de energías renovables limitadas. Este hidrógeno se podría utilizar para la calefacción y electricidad de las casas de sus habitantes, para producir agua independiente del estado de cuencas hidrográficas durante los 365 días del año, electricidad para atender barcos de turismo que requieren apoyo de servicios. También podría ser transportado en barcos a otros territorios o incorporarlo en el transporte de buses, autos o camiones eléctricos en la isla que aportarían un gran aumento en su economía, desarrollando así también un buen enfoque ecológico con una huella libre de carbono [65].

Cabe recalcar que un vehículo autónomo es capaz de lograr una autonomía de 550 [km] con sólo 5 [kg] de hidrógeno. Lo que significaría una gran ventaja y oportunidad como isla, con respecto a su economía y dependencia de combustibles fósiles, transporte, entre otros para obtener su electricidad.

Si se requiere de energía inmediata, el hidrógeno puede brindarla directamente y si no se requiere, almacenarse fácilmente.

Finalmente se podría transformar electricidad renovable en hidrógeno y luego darle la aplicación conocida como **“Power-to-X”**, proceso que permite la penetración de Energías Renovables Variables (VRE) en sectores difíciles de electrificar, por ejemplo: democratizando agua y energía en todos los sectores de la Isla [66].

4.6 Cálculo total de emisiones de CO₂ emitidas por la Isla

Gracias a los datos recopilados con anterioridad, la isla consume 250.000 [L] de combustible fósil por año aproximadamente. Se sabe que tan solo 1 litro es capaz de emitir 2,32 kg de CO₂.

Obteniendo así:

$$(1) \times (250.000) \times (2,32 [\text{Kg}]) = 580.000 [\text{Kg}] \text{ de CO}_2 \quad (3)$$

Es decir que la isla emite una cantidad de 580.000 kg de CO_2 por año correspondiente a combustibles fósiles (580 Toneladas [$\text{CO}_2/\text{año}$]).

4.7 Conclusiones

A pesar de la posición geográfica de la isla esta posee condiciones aptas para la instalación fotovoltaica, aunque no se tenga con certeza si existirán problemas durante la obtención de recursos dada su alta cantidad de nubosidad anual.



CAPÍTULO 5. ESTUDIO DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN KW EN LA ISLA MOCHA Y SU POTENCIAL SOLAR.

5.1 Introducción

Para realizar el estudio del consumo necesario para la isla, se realizarán cálculos y estimaciones para así determinar tanto la cantidad de paneles solares necesarios para alimentar la isla y la cantidad de hidrógeno necesaria a producir. Cabe destacar que estas serán aproximaciones dado a que no se tienen datos concretos del consumo de años cercanos, por lo que se realizará una proyección respecto a ella.

5.2 Evaluación de la cantidad de paneles solares a usar

De acuerdo con los datos del consumo anual de la isla para el año 2017, sabemos que la cantidad de esta es de 220.181 kWh, teniendo este dato es que podremos determinar la cantidad de paneles fotovoltaicos que se necesitarán con respecto a este consumo [62].

La marca usada será el **Panel fotovoltaico Dah 450 Watt Perc, Mono Half Cell, módulo DHM-72L9**.

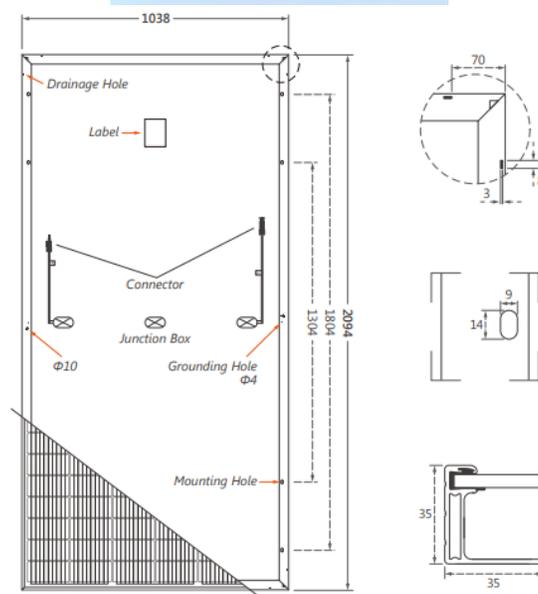


Figura 5.2.1 “Diseño panel solar DHM-72L9”

Fuente: Datasheet Panel FV DAH, DHM-72L9

Las especificaciones técnicas están dadas a continuación:

Tabla 5.2.1 “Especificaciones técnicas panel solar DHM-72L9”

Tipo de celda	Monocrystalina 166x83mm
Dimensión	2094×1038×35mm
Peso	23.5kg
Garantía	25 años

Fuente: Datasheet Panel FV DAH, DHM-72L9, Elaboración propia

Características:

Tabla 5.2.2 “Características panel solar DHM-72L9”

Potencia máxima (Pmax)	430~460W
Tensión máxima	42.41V
Eficiencia modulo	21.16%
Tensión máxima del sistema	1000V/1500V DC
Temperatura de funcionamiento	-40 ~ +85°C

Fuente: Datasheet Panel FV DAH, DHM-72L9, Elaboración propia

Certificaciones:

Tabla 5.2.3 “Certificación panel solar DHM-72L9”

Certificaciones Panel Solar
IEC 61215 / IEC 61730 / CE / INMETRO
ISO 9001: 2015/Quality management system
ISO 14001: 2015/Standards for environmental management system
OHSAS 18001: 2007/International standards for occupational health & safety

Fuente: Datasheet Panel FV DAH, DHM-72L9, Elaboración propia

Ya con el modelo elegido se determina la cantidad de paneles solares para la cantidad de energía consumida el año 2017. Esta será representada a través de la siguiente expresión [67]:

Donde:

$$N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{Ed}{WpH} \quad (4)$$

Ed : Cantidad de energía consumida diaria.

Wp : Potencia máxima nominal de panel solar.

H : Cantidad de horas de radiación solar.

Para determinar la energía consumida diariamente tomaremos la potencia anual de 220.181 kWh y se tomará por 365 de un año normal, obteniendo aprox. 603 kWh por día.

$$\text{Energía consumida diaria} = \frac{220.181 \text{ kWh}}{365} = 603.24 \text{ kWh} \quad (5)$$

La potencia máxima nominal del panel es de 460 [W] y la cantidad de horas de radiación solar se tomarán 8 horas diarias, dada las condiciones de la isla en los meses de junio que llega a su mínima irradiancia solar, o sea bajo las condiciones más desfavorables.

$$N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{603 \text{ kWh}}{460 \text{ W} \cdot 8\text{h}} = 164 \quad (6)$$

Lo que finalmente nos da una cantidad de 164 paneles solares para suministrar la energía necesaria con respecto al modelo antes propuesto.

5.3 Potencia Producida y eficiencia

Para realizar la Proyección de la Potencia Producida por la Isla Mocha, se tomarán datos obtenidos desde el Explorador Solar, que proporcionan la cantidad de Radiación Solar obtenida para los años 2014-2016, donde estos están representados en W/m^2 por lo que estos serán llevados a la unidad de Kwh/m^2 a través de la siguiente regla:

$$1W/m^2 = 24Wh/m^2 \quad (7)$$

$$1W/m^2 = 0,024 Kwh/m^2 \quad (8)$$

esto se corregirá en el software de Excel de Microsoft Office a trabajar.

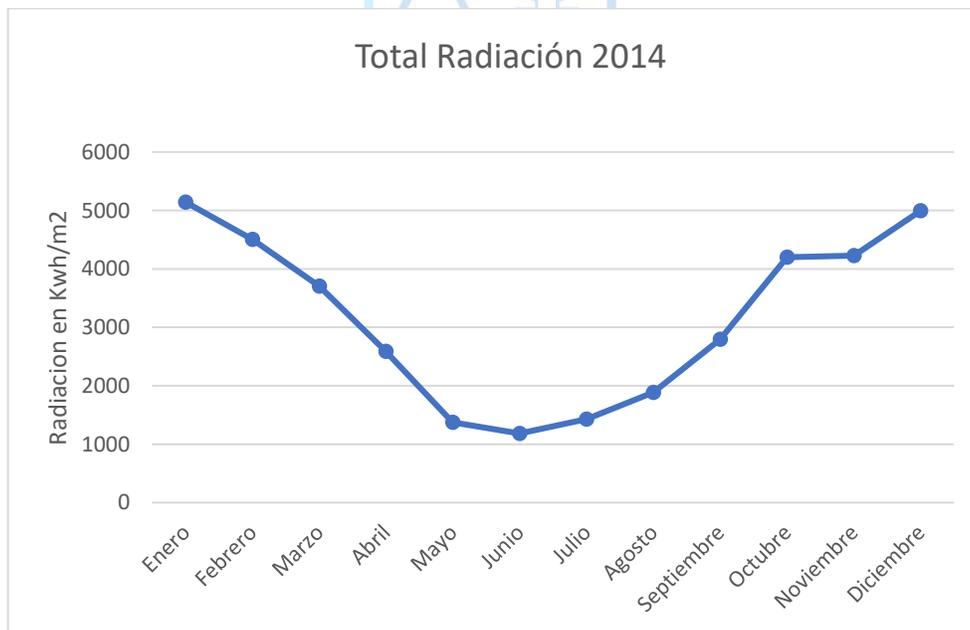


Figura 5.3.1 “Grafica cantidad de Radiación anual por mes, año 2014”

Fuente: Elaboración propia

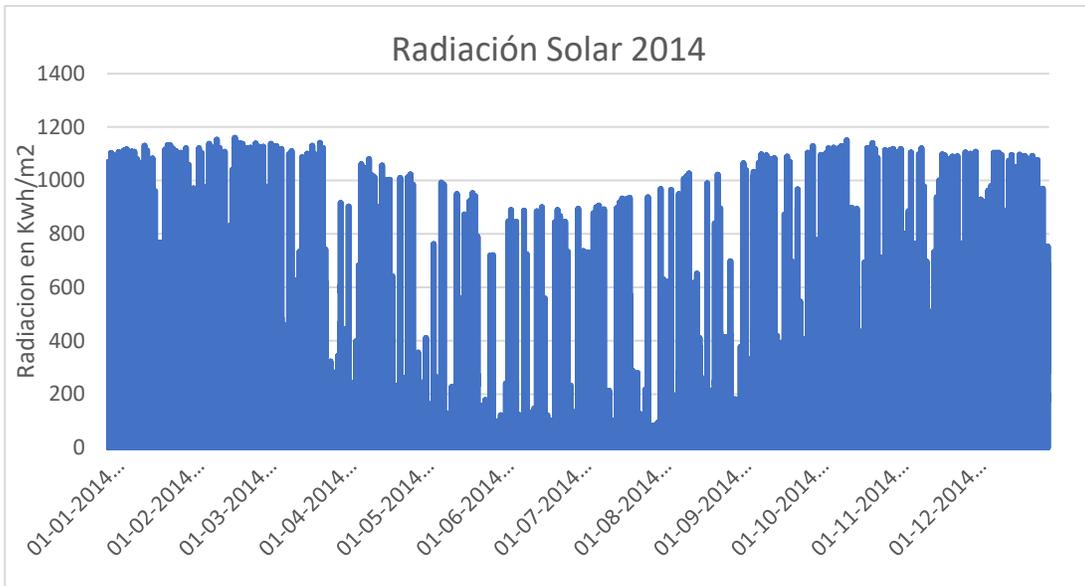


Figura 5.3.2 “Gráfica de datos Radiación 2014”

Fuente: Elaboración propia

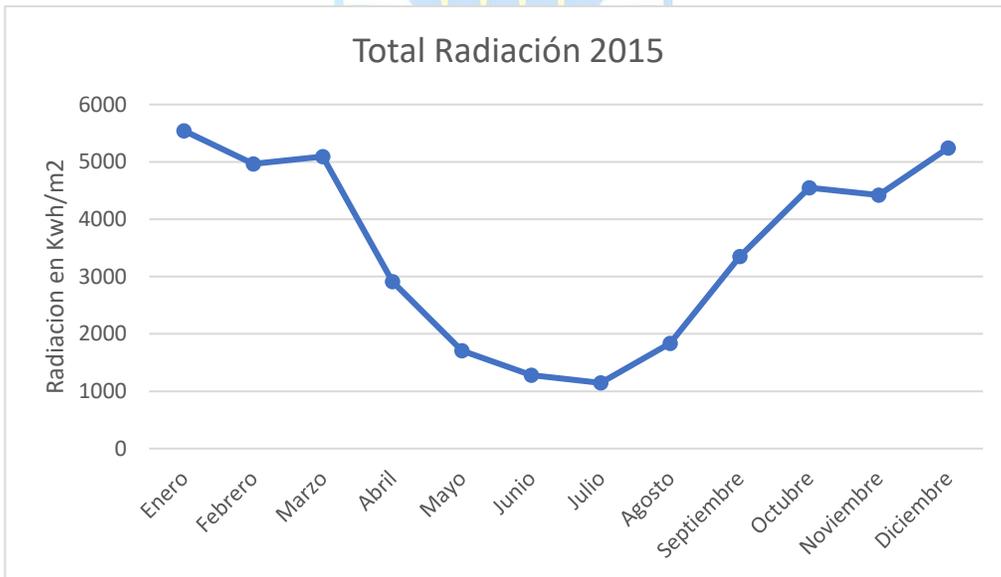


Figura 5.3.3 “Gráfica cantidad de Radiación anual por mes, año 2015”

Fuente: Elaboración propia.

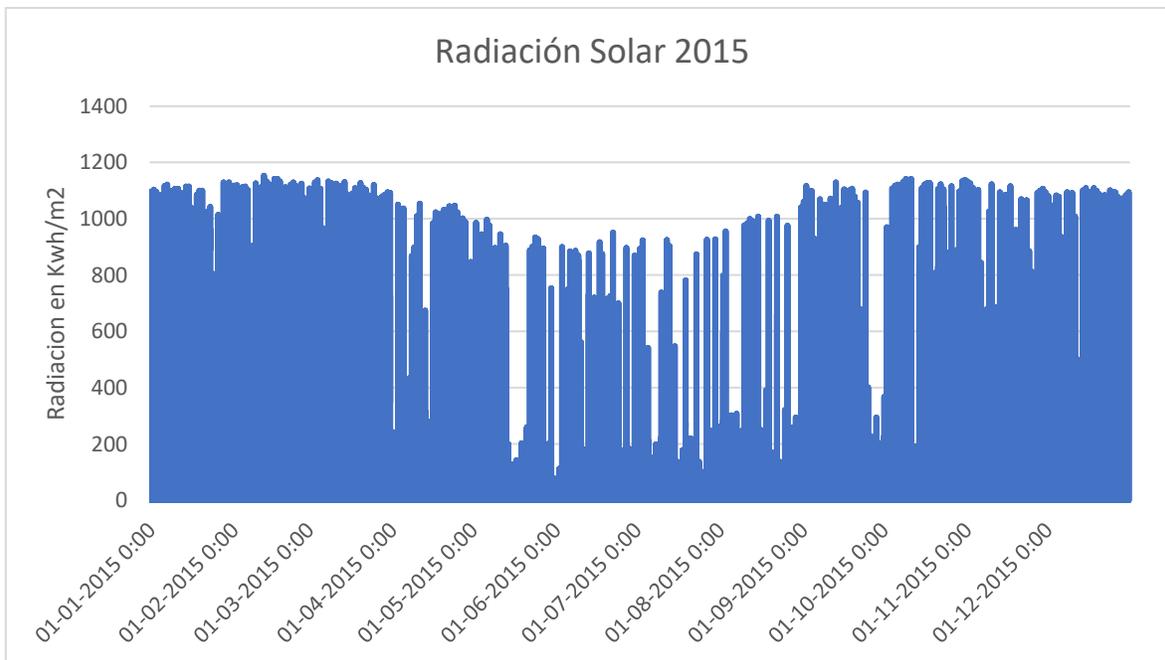


Figura 5.3.4 “Gráfica de datos Radiación 2014”

Fuente: Elaboración propia.

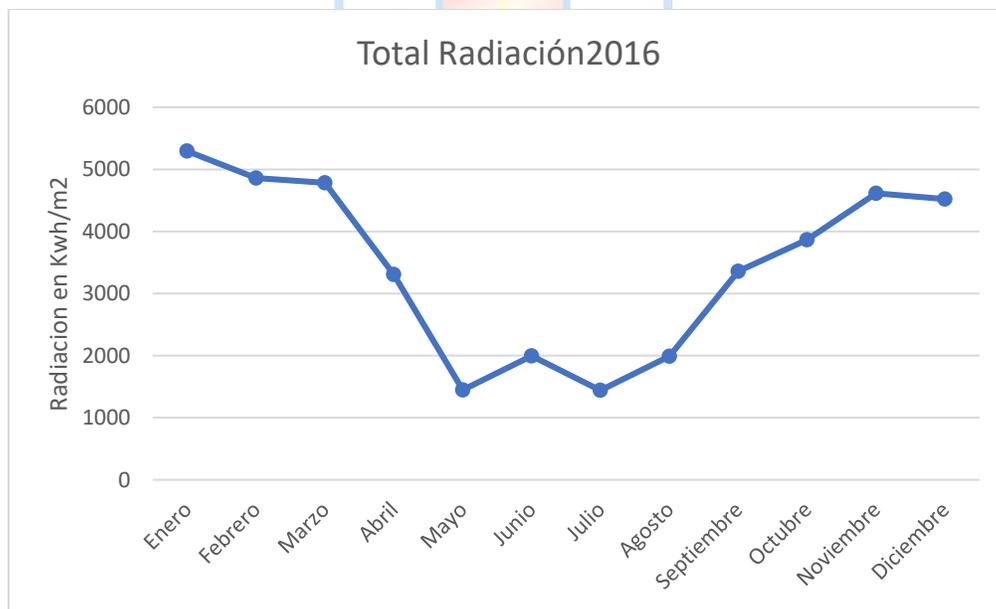


Figura 5.3.5 “Gráfica cantidad de Radiación anual por mes, año 2016”

Fuente: Elaboración propia.

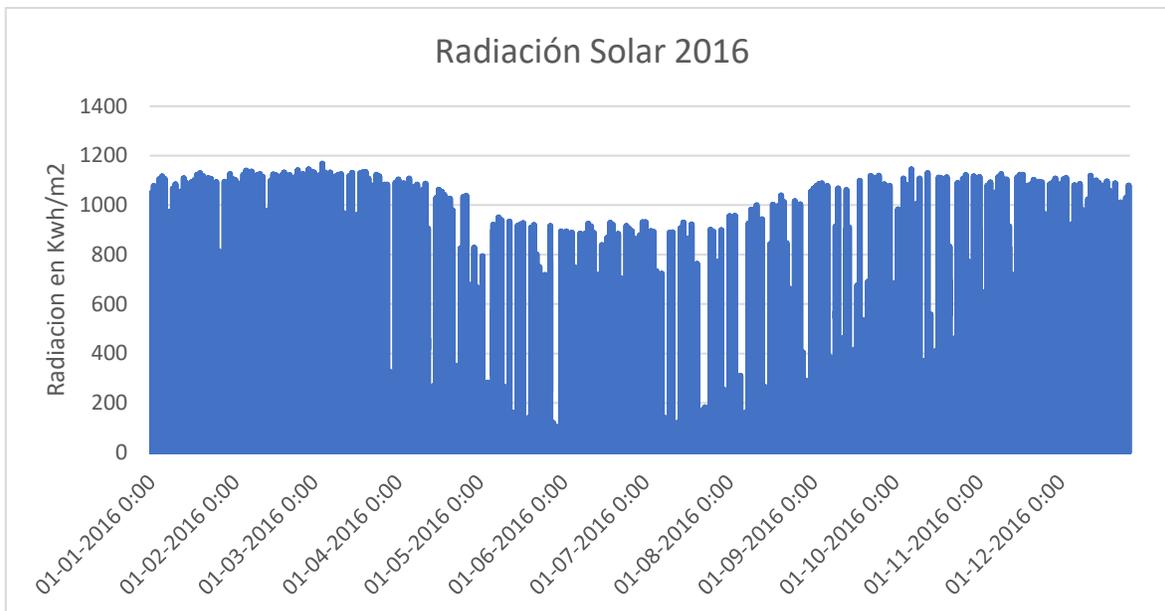


Figura 5.3.6 “Gráfica de datos Radiación 2014”

Fuente: Elaboración propia

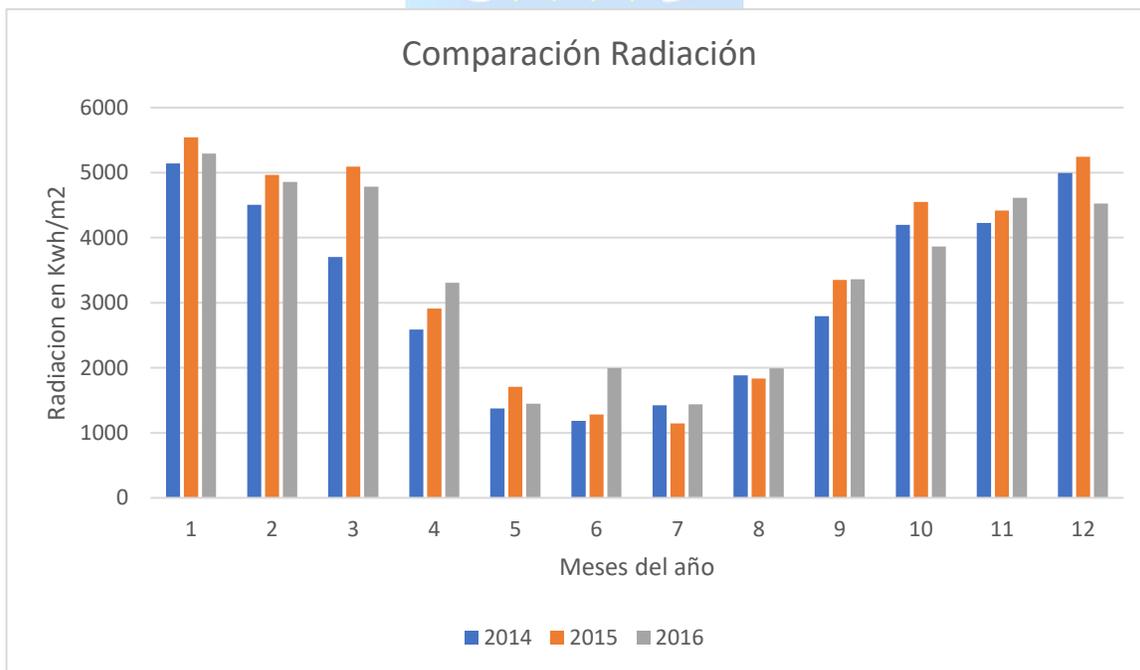


Figura 5.3.7 “Grafica de comparación, cantidad de Radiación mensual a tres años”

Fuente: Elaboración propia.

Según los datos dados por el Explorador Solar para el año 2014 el índice de radiación solar es mucho más bajo en comparación a los años 2015 y 2016, siendo estos dos últimos considerablemente más altos, salvo algunas excepciones. Con esto podemos concluir que la radiación en la isla permanece dentro de ciertos márgenes, pero siempre con variaciones a lo largo de los meses y años, dado a que la radiación producida puede variar por varios factores [15].

Es por esto por lo que lo más conveniente para saber la cantidad de radiación que se puede obtener es realizando un promedio entre los años anteriores, como también viendo el total producido.

Con el total de potencia producida para 3 años simultáneos, se obtiene que para el año 2014 la cantidad de radiación obtenida en kWh/m² es de 38.018, mientras que para el año 2016 es de 41.486, lo que equivale a un crecimiento de un 9%. Por otra parte, al considerar el año 2015 donde hubo una cantidad de radiación de 42.044 el crecimiento fue de un 11%.

Tabla 5.3.1 “Radiación total 3 años en kWh/m²”

	2014	2015	2016
Radiación total 3 años en kWh/m ²	38.017,76592	42.043,80984	41.485,96728

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.3.2 “Porcentaje de crecimiento”

	2015	2016
Porcentaje de crecimiento	11%	9%

Fuente: Elaboración propia.

Para el año 2014 se presentan un total mínimo y máximo de índice de Radiación Solar en los meses de junio y enero respectivamente, mientras que en los años posteriores fueron

representados por los meses de julio y enero. El Total promedio entre estos mínimos y máximos en Kwh/m^2 es de:

Tabla 5.3.3 “Radiación máxima y mínima promedio anual”

Radiación máxima	5.327,21992
Radiación mínima	1.256,1156

Fuente: Elaboración propia.

También se tiene la Radiación máxima y mínima mensual promedio, que se determinó a partir de los datos obtenidos de forma mensual por la cantidad de estos, dando una cantidad representada en Kwh/m^2 de:

Tabla 5.3.4 “Radiación máxima y mínima promedio mensual”

Radiación máxima	7,160241828
Radiación mínima	1,705993093

Fuente: Elaboración propia.

Se debe recordar que la cantidad de energía que se genera en condiciones estándar ($1000 W/m^2$ y $25\text{ }^\circ\text{C}$) se denomina capacidad del sistema y corresponde la eficiencia nominal de la celda multiplicada por el área a cubrir con paneles [15].

$$\text{Capacidad} = \text{Area instalada} \cdot \text{Eficiencia nominal} \quad (9)$$

La eficiencia del panel solar es de un 21,16% máximo, esta dependerá totalmente de las condiciones como la temperatura. Mientras menor es la temperatura de la celda mayor es su capacidad de producir energía eléctrica. Los paneles fotovoltaicos que existen actualmente poseen un amplio rango de sensibilidades a la temperatura, para nuestro Panel fotovoltaico Dah 450 Watt Perc, Mono Half Cell, módulo DHM-72L9 estos rangos serian:

Tabla 5.3.5 “Datos de Rangos de Temperatura panel solar”

Rangos de temperatura panel solar	
Temperature Coefficient of Isc	0.05%/°C
Temperature Coefficient of Voc	0.31%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	0.35%/°C

Fuente: Standard Test Environment : Irradiance 1000W/m² , Cell temperature 25°C, Spectrum AM1.5, Elaboración propia

La temperatura de la celda tiene relación con la temperatura ambiente, pero a la vez con la cantidad de radiación incidente, la velocidad del viento y las condiciones de ventilación del panel. Es por esto, que un mismo sistema generará más energía si se instala en una estructura aislada que sobre un techo [15].

5.4 Factor de Pérdidas

Durante el funcionamiento de un sistema fotovoltaico, debido a causas anexas se va perdiendo corriente eléctrica. Las pérdidas en promedio son cercanas a un 14% y depende de suciedad acumulada sobre el panel, sombras del entorno (árboles, construcciones), imperfecciones del panel, conexiones y cableado, otras causas técnicas, además del tiempo apagado por mantenciones [15].

5.5 Elección inversor de corriente

La corriente producida por los paneles fotovoltaicos es de tipo continua, la cual debe ser transformada en corriente alterna para así ser utilizada por los habitantes de la isla, para esto se necesita un inversor de corriente. En este proceso también se producen pérdidas, aunque están dependerán de la eficiencia del inversor elegido.

En este proyecto se propone un inversor de corriente **EPEVER-inversor NP5000-42**, el cual tiene una potencia de 5 KW. **El Datasheet de este irá en la sección de ANEXOS.**



Figura 5.5.1 “Inversor NP5000-42”

Fuente: Datasheet EPEVER-inversor NP5000-42.

Se sabe que la potencia máxima nominal de nuestro panel solar es de 460 W y la cantidad de paneles a utilizar será de 164, por lo que nuestra instalación fotovoltaica tendrá una potencia total de 75.440 W, por lo que se utilizarán 16 inversores de 5 kW lo que nos da una potencia de 80 kW.

5.6 Calculo potencia necesaria (kW)

Si se sabe que el consumo energético promedio anual en la isla es de 220.181 kWh, fácilmente se puede calcular la potencia necesaria por hora, para así tener en consideración cuantas pilas utilizar.

Al tomar los 220.181 kWh y se dividirá por los 365 días del año, se obtiene el consumo energético diario.

Si se divide este monto en la cantidad de horas que tiene el día (24 Hrs), se obtiene la cantidad de consumo energético por hora.

$$\frac{604 \text{ [kWh]} [1 \text{ dia}]}{24 \text{ [dia]} [24 \text{ h}]} = 25,1 \text{ [kW]} \approx 26 \text{ [kW]} \quad (10)$$

Por ende, se necesita una potencia de 26 [kW] por hora para abastecer de energía a la Isla sin problemas.

5.7 Paneles Fotovoltaicos: Cantidad de horas con y sin funcionamiento por año

Si se toman en cuenta las peores condiciones, los paneles solares están en accionamiento 8 horas. al día, lo que equivale a un tercio de él.

Quiere decir que pasan 16 horas. al día sin operar, si se multiplica por la cantidad de horas que tiene un año se obtiene el valor de las horas por año sin funcionamiento de estos.

$$8 \text{ h} \rightarrow 24 \text{ h} \rightarrow 16 \text{ h} \quad (11)$$

$$1 \text{ año} \rightarrow 365 \text{ días} \rightarrow 8.760 \text{ h} \quad (12)$$

Obteniendo así 5840Hrs de intermitencia, equivalentes a 243 días.

$$8.760 \text{ h} - 5.840 \text{ h} = 2.920 \text{ h} \quad (13)$$

En consecuencia, los paneles están en accionamiento 2.920 horas al año.

$$\frac{2.920 \text{ h}}{24 \text{ h}} = 121,6 \approx 122 \text{ Días} \quad (14)$$

Equivalentes a los 122 días restantes de los 365 en su totalidad.

5.8 Recolección de datos para cálculos asociados

Gracias a los datos recopilados en nuestro proyecto se pueden realizar los cálculos y estudios correspondientes.

- El consumo energético promedio mensual en la isla es de 78 [kWh].
- El consumo energético promedio anual en la isla es de 220.181 [kWh].
- Actualmente la isla genera 200 [kW].
- El Hidrógeno logra entregar una energía de 141 [mJ/kg] por unidad de masa.
- Para producir 1 kg de H₂ se necesita en promedio 55 [kWh].

- Los paneles solares están en accionamiento 8 Hrs al día, lo que equivale a un tercio de él.
- Los paneles solares no están en funcionamiento 16 Hrs al día, equivalente a 5840 Hrs, es decir aproximadamente 244 días del año
- Un electrolizador de 1 MW obtiene 207 [Nm³/h] y consumiendo 4.53 [kWh/Nm³].
- En el proceso de enfriamiento o licuación se consume 13,3 [kWh/Kg].
- En el proceso de compresión se consume de 2 a 3 [kWh/kg].
- Se requieren entre 10-12 litros de Agua para generar 1 kg] de H₂.
- 1 [kg] de Hidrógeno solventa 6,5 litros de gasolina (4,7 [kg]).
- 8 [kg] de Hidrógeno solventa 40 litros de diésel (34 [kg]).
- 11 [kg] de Hidrógeno solventa 50 litros de diésel (42 [kg]).
- La Isla consume 250.000 litros de combustible fósil.
- 1 litro de combustible fósil emite 2,32 [kg] de CO₂.
- Con 5[kg] de H₂ se logra una autonomía de 550 [km] en un automóvil.
- Circunferencia de la tierra 40.075 [km].
- Potencia nominal pila de combustible 5 [kW].
- Voltaje DC entregado por la pila de combustible 72 [V].
- Corriente máxima pila de combustible 90 [A].
- Cantidad de celdas de la pila 120.

5.9 Evaluación pila de combustible utilizada

Actualmente empresas como **Nedstack**, **direct industry**, **Horizon fuel Cell technologies**, **Ballard**, **Soul**, entre otras, se especializan en el mercado de las pilas de combustible.

En este caso se seleccionó el modelo comercializado por la empresa “**Horizon**”

Pila de combustible de Hidrógeno tipo PEM: “FCS-C5000”



Figura 5.9.1 “Pila de combustible de H₂ a utilizar “FCS-C5000”

Fuente: “FuelCellstore.com”, productos

Como la finalidad es generar la cantidad de kW necesarios para el suministro, así como también abaratar costos, se escogió esta pila tipo PEM debido a su gran potencia de salida (kW), está diseñada específicamente para aplicaciones estacionarias especialmente para la generación y distribución de energía. Presenta una respuesta rápida, dinámica y su comportamiento con respecto a la producción a escala es buena (existe uniformidad), además de ofrecer una larga vida útil, dependiendo la aplicación que se le dé, ya sea operando de manera continua o intermitente en la generación de energía según la demanda requerida [68].

El módulo de energía alimentado con hidrógeno brinda una solución debido a ser versátil, requiere una fácil instalación, además de ser de bajo riesgo para los integradores de sistemas, respaldada por la experiencia y los conocimientos inigualables de **Horizon**.

Tabla 5.9.1 “Especificaciones técnicas de la celda de combustible FCS-C5000”

Type of fuel cell	PEM
Number of cells	120
Rated Power	5000W
Performance	72V @ 70A
H2 Supply valve voltage	12V
Purging valve voltage	12V
Blower voltage	24V
Reactants	Hydrogen and Air
External temperature	5 to 30°C
Max stack temperature	65°C
H2 Pressure	0.45-0.55bar
Hydrogen purity	≅ 99.995% dry H2
Humidification	self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Weight (with fan & casing)	30kg (±200g)
Controller	2.5kg (±100g)
Dimension	65cm x 35cm x 21.2cm
Flow rate at max output*	65 L/min
Start up time	≅ 30S at ambient temperature
Efficiency of stack	40% @ 72V
Low voltage shut down	60V
Over current shut down	90A
Over temperature shut down	65°C
External power supply**	24V(±1V), 8A~12A

Fuente: Manual FCS-C5000, fuelcellstore.com

Con respecto al consumo energético se conoce que para producir 1 kg de H₂ se necesita entre 50-60 kWh, en promedio 55 kWh, por ende, se puede calcular cuanta energía es capaz de producir una pila de combustible por kWh, para así obtener el costo energético total aproximado [42].

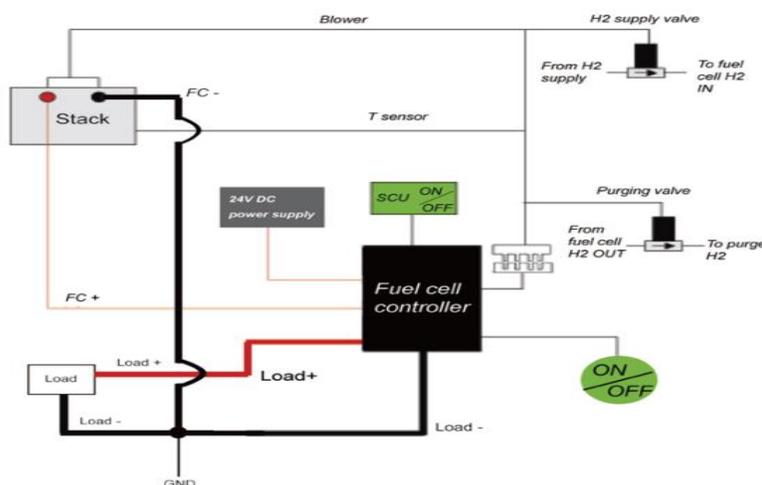


Figura 5.9.2 “Diagrama de configuración del sistema”

Fuente: Manual FCS-C5000, fuelcellstore.com

Donde GND hace referencia a la Ground (Tierra) y SCU a Short Circuit Unit, ayuda a acondicionar la pila de combustible para un buen rendimiento a largo plazo.

Las gráficas de comportamiento de la pila a utilizar están dadas en el manual correspondiente, estas son:

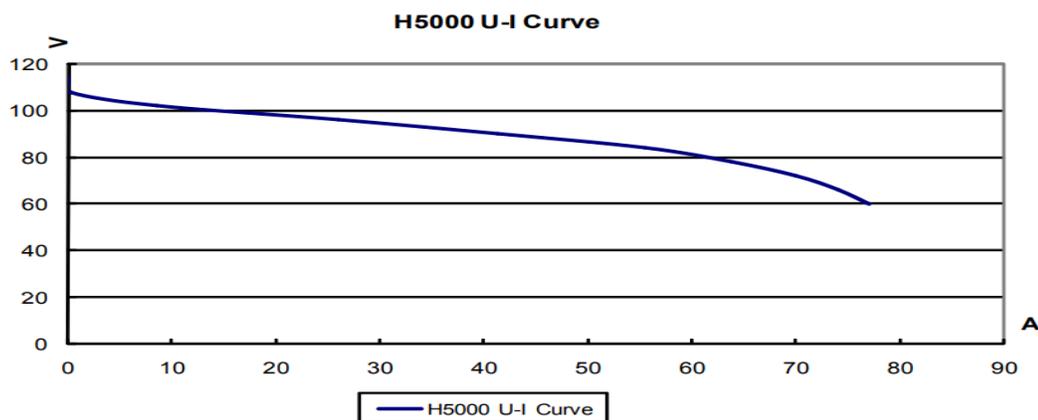


Figura 5.9.3 “Gráfica Comportamiento en función del voltaje con respecto a la corriente”

Fuente: Manual FCS-C5000, fuelcellstore.com

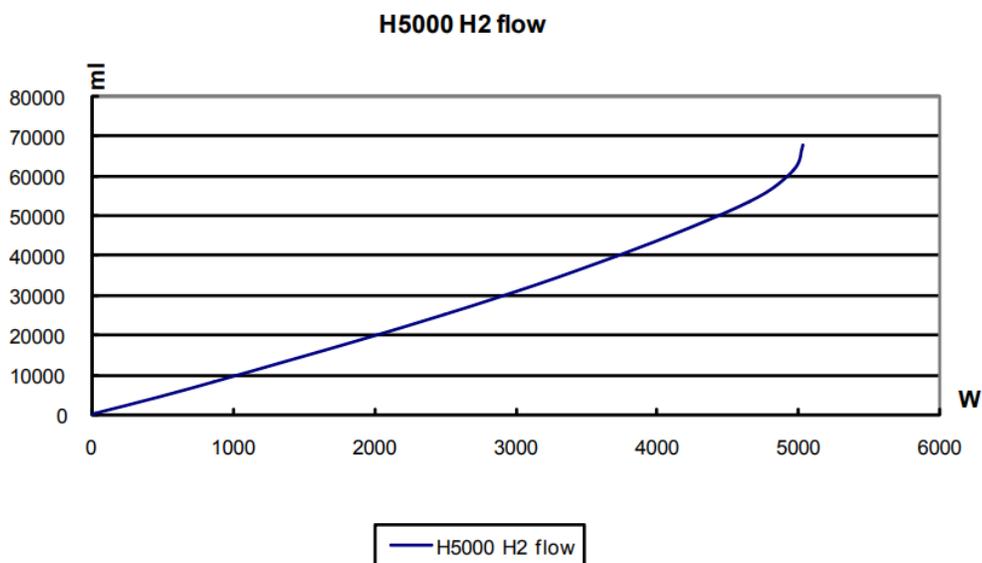


Figura 5.9.4 “Gráfica Caudal H₂ (ml) con respecto a la potencia”

Fuente: Manual FCS-C5000, fuelcellstore.com

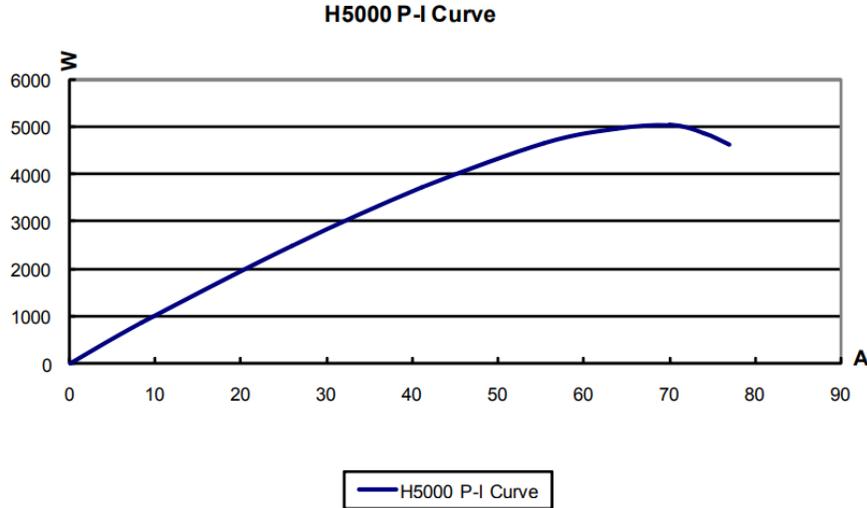


Figura 5.9.5 “Gráfica Comportamiento de la pila con respecto a la potencia en función a la corriente”

Fuente: Manual FCS-C5000, fuelcellstore.com

5.9.1 Pilas de Combustible: Cálculo de cantidad a utilizar

Gracias a los cálculos obtenidos con anterioridad, ya se sabe que se necesita una potencia de 26 [kW] para abastecer de energía a la Isla sin problemas (por día).

A su vez sabiendo que la potencia que entrega nuestra pila es de 5 [kW] se puede realizar fácilmente la operación correspondiente para saber cuántas pilas requiere el sistema,

$$\frac{\text{Potencia Necesaria}}{\text{Potencia obtenida}} = \frac{26 \text{ [kW]}}{5 \text{ [kW]}} = 5,2 \approx 6 \text{ Pilas de Combustible} \quad (15)$$

5.9.2 Pilas de Combustible: Voltaje Generado

Al saber que el sistema necesitará solo 6 pilas de combustible para solventar con las exigencias requeridas para su correcto funcionamiento es posible calcular la cantidad de voltaje producido por estas.

$$(72V)(6\text{Pilas}) = 432[V] \quad (16)$$

5.9.3 Pilas de Combustible: Cantidad de H₂ necesaria

Gracias a los cálculos obtenidos con anterioridad, es posible hacer el cálculo sobre cuánto H₂ necesitará nuestro sistema para abastecer de suministro eléctrico a la isla.

El cálculo está asociado al H₂ necesario para abastecer a la isla en equivalencia de consumo energético por año.

Es necesario tener en consideración que la unidad de medida “[lpm]” ya viene normalizada, y hace referencia a la cantidad de litros por minuto en condiciones ideales.

Ésta es una tasa de flujo volumétrico de un gas equivalente a $\frac{1}{1000} = [m^3]$ de gas a 70 [°F] (21,11 [°C] y 294 [K] aproximadamente) y 14.7 [psi] (0,0689476 [bar]).

$$1 \text{ litro por minuto de H}_2 \text{ (lpm)} \rightarrow \text{Tiene una masa de } 0,0708 \text{ [kg]} \quad (17)$$

A su vez se sabe que:

$$0,0708 \text{ [kg]} \rightarrow \text{Equivalente a } 70,8 \text{ gramos} \quad (18)$$

Al mencionar Normalizado se hace referencia a las condiciones ideales tales como:

$$0[^\circ\text{C}] \rightarrow -273,15[\text{K}] \quad (19)$$

$$\text{Presión atmosférica de } 1 \text{ [atm]} \rightarrow 1,01325 \text{ [bar]} \quad (20)$$

$$101.325 \text{ [Pa]} \rightarrow 101,3 \text{ [KPa]} = 760 \text{ [mmHg]} \quad (21)$$

- Humedad relativa de 0%

Los siguientes cálculos se realizarán utilizando un factor de N=1, estudiando su comportamiento en las condiciones ideales mencionadas anteriormente.

5.9.4 Pilas de Combustible: Factores de corrección

Utilizando las condiciones ideales para su funcionamiento se procede a realizar las siguientes operaciones matemáticas para obtener sus factores de corrección.

Se utilizarán los datos correspondientes al promedio de las variables con respecto a las condiciones ambientales del último año en la isla.

Para ello, fue necesario acceder a la base de datos de la dirección meteorológica chilena, desde la página web de climatología del gobierno Chile [69].

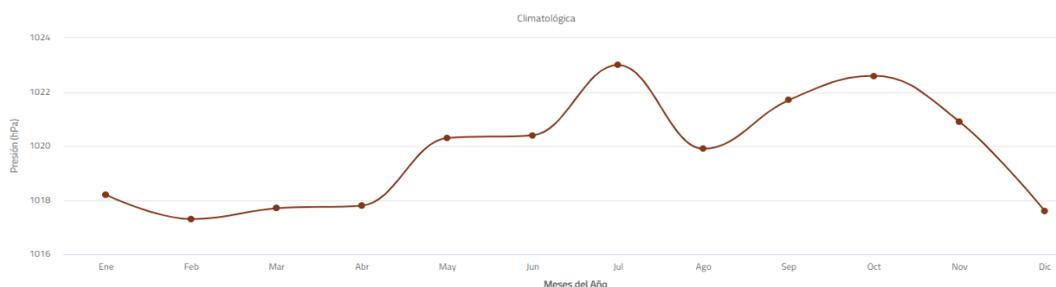


Figura 5.9.6 “Gráfico Promedio mensual (presión atmosférica [hPa] / Meses) de la isla en el 2021”

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Productos Climáticos (Anuales)

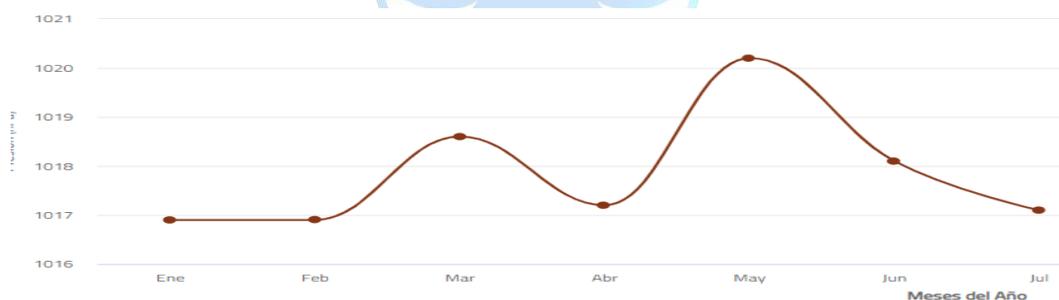


Figura 5.9.7 “Gráfico Promedio mensual (presión atmosférica [hPa] / Meses) de la isla en lo que va del 2022 (Desde Enero hasta Julio)”

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Productos Climáticos (Anuales)



Figura 5.9.8 “Gráfico Promedio mensual (Temperatura [°C] / Meses del año) de la isla en el 2021”

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Productos Climáticos (Anuales)



Figura 5.9.9 “Gráfico Promedio mensual (Temperatura [°C] / Meses del año) de la isla en lo que va del 2022”

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Productos Climáticos (Anuales)



Figura 5.9.10 “Gráfico Promedio mensual (Humedad relativa del aire [%] / Meses del año) de la isla en el 2021”

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Productos Climáticos (Anuales)



Figura 5.9.11 “Gráfico Promedio mensual (Humedad relativa del aire [%] / Meses) de la isla en 2022”

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Productos Climáticos (Anuales)

Con todos los datos de los gráficos visualizados anteriormente se realizó la siguiente tabla correspondiente a los promedios mensuales, tanto de presión atmosférica ([kPa], haciendo su respectiva conversión a [mmHg]), temperatura ([°C]) y humedad relativa del aire ([%]).

Tabla 5.9.2 “Promedio mensual temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en función de los meses y sus respectivas conversiones de unidades de medida. (Basándose en las condiciones ambientales de los últimos 12 meses en la Isla Mocha). (Julio 2021 - Julio 2022)”

Último año	Temperatura [°C] - [K]	HR [%]	Presión atmosférica [hPa]-[mmHg]
Julio 2022	9,4 [°C]-282,55 [K]	87,3	1017,1[hPa] -762,82[mmHg]
Junio 2022	9,8 [°C]-282,95 [K]	89,2	1018,1[hPa]-763.64[mmHg]
Mayo 2022	10,7 [°C]-283,85 [K]	86,5	1020,2[hPa]-765,22[mmHg]
Abril 2022	12,4 [°C]-285,55 [K]	86,8	1017,2[hPa]-762,96[mmHg]
Marzo 2022	14,4 [°C]-287,55 [K]	82,9	1018,6[hPa]-764,01[mmHg]
Febrero 2022	16,7 [°C]-289,85 [K]	82,5	1016,9[hPa]-762,74[mmHg]
Enero 2022	16,5 [°C]-289,65 [K]	82	1016,9[hPa]-762,74[mmHg]
Diciembre 2021	14,6 [°C]-287,75 [K]	82,3	1017,6[hPa]-763,26[mmHg]
Noviembre 2021	13,4 [°C]-286,55 [K]	82,2	1020,9[hPa]-765,74[mmHg]

Octubre 2021	11,6 [°C]-284,75 [K]	82,8	1022,6[hPa]-767,02[mmHg]
Septiembre 2021	10,7 [°C]-283,85 [K]	85,7	1021,7[hPa]-766,34[mmHg]
Agosto 2021	10,4 [°C]-283,55 [K]	87	1019,9[hPa]-764,99[mmHg]
Julio 2021	10,2 [°C]-283,35 [K]	86,6	1023,0[hPa]-767,32[mmHg]

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Elaboración propia

Gracias a las operaciones y datos recopilados, es posible calcular los factores de corrección de las variables (temperatura, presión atmosférica y humedad relativa), se puede obtener la aproximación más cercana con respecto al flujo o caudal. Así se sabrá de manera exacta cuánto volumen de agua necesitará nuestro sistema para la alimentación de suministro eléctrico a la Isla con respecto a su consumo por hora, como también por año.

Considerando las condiciones ideales, se tiene:

$$\text{Temperatura de } 0[^\circ\text{C}] \rightarrow 273,15[\text{K}] \quad (22)$$

$$\text{Presión atmosférica de } 1 [\text{atm}] \rightarrow 760 [\text{mmHg}] \quad (23)$$

$$\text{Humedad relativa de } 0\% \quad (24)$$

Para obtener los valores de los factores de corrección para los cálculos asociados se utilizarán las siguientes fórmulas, en base a los valores reales de las variables (Temperatura, presión atmosférica y humedad relativa) con respecto a sus valores ideales.

Tabla 5.9.3 “Formulario Factores de corrección”

<p>Factor corrección Temperatura (FTEMP):</p> $\frac{273,15 [K]}{\text{Temperatura del lugar}}$
<p>Factor corrección Presión (FP):</p> $\frac{\text{Presión del Lugar [mmHg]}}{760[\text{mmHg}]}$
<p>Factor corrección Humedad Relativa (FHR):</p> $\frac{[760[\text{mmHg}] - (FP[\text{mmHg}] \cdot \text{Temperatura del lugar} \cdot HR)]}{760[\text{mmHg}]}$
<p>Factor corrección total (FT):</p> $FTEMP \cdot FP \cdot FHR$

Fuente: Elaboración propia

Utilizando las ecuaciones se obtiene la Tabla 5.9.4, indicando los factores de corrección para cada variable con respecto a los meses del último año.

Tabla 5.9.4” Factores de corrección mensuales de las variables temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en función a los promedios mensuales de la isla (Basándose en las condiciones ambientales de los últimos 12 meses). (Julio 2021 - Julio 2022)”

ÚLTIMO AÑO	FTEMP	FHR	FP
Julio 2022	0,9667	0,9891	1,0037
Junio 2022	0,9653	0,9884	1,0047
Mayo 2022	0,9623	0,9877	1,0068
Abril 2022	0,9565	0,9857	1,0038
Marzo 2022	0,9499	0,9842	1,0052
Febrero 2022	0,9423	0,9818	1,0036
Enero 2022	0,9430	0,9821	1,0036
Diciembre 2021	0,9492	0,9841	1,0042
Noviembre 2021	0,9532	0,9854	1,0075
Octubre 2021	0,9592	0,9872	1,0092
Septiembre 2021	0,9623	0,9878	1,0083

Agosto 2021	0,9633	0,9880	1,0065
Julio 2021	0,9640	0,9882	1,0096
PROMEDIO	0,9567	0,9861	1,0059

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Elaboración propia

Dados los valores de la Tabla anterior, podemos determinar una gráfica demostrativa de los factores de corrección que existen de forma mensual.

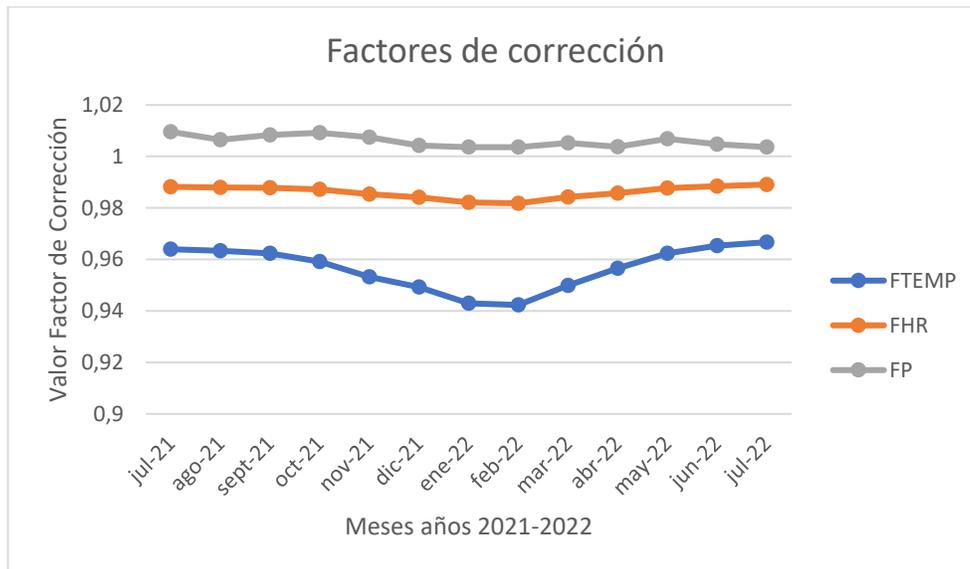


Figura 5.9.12 “Factores de corrección mensuales de las variables temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en función a los promedios mensuales de la isla (Basándose en las condiciones ambientales de los últimos 12 meses). (Julio 2021 - Julio 2022)”

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Elaboración propia

Gracias a los factores de corrección de los valores reales con respecto al promedio mensual de las tres variables en función de los últimos 12 meses es posible calcular el factor de corrección total de cada mes, como también el factor total promedio obteniendo así la siguiente tabla:

Tabla 5.9.5 “Factor de corrección total de cada mes y factor total promedio”

<u>ÚLTIMOS 12 MESES.</u>	<u>FACTOR DE CORRECCIÓN TOTAL. (FT)</u>	<u>FT (%)</u>
Julio 2022	0,9597	95,97%
Junio 2022	0,9576	95,76%
Mayo 2022	0,9569	95,69%
Abril 2022	0,9464	94,64%
Marzo 2022	0,9397	93,97%
Febrero 2022	0,9284	92,84%
Enero 2022	0,9294	92,94%
Diciembre 2021	0,9380	93,80%
Noviembre 2021	0,9463	94,63%
Octubre 2021	0,9556	95,56%
Septiembre 2021	0,9584	95,84%
Agosto 2021	0,9579	95,79%
Julio 2021	0,9617	96,17%
PROMEDIO	0,9489	94,89%

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Elaboración propia

Dados los datos de Tabla anterior, se puede realizar la siguiente demostración gráfica:

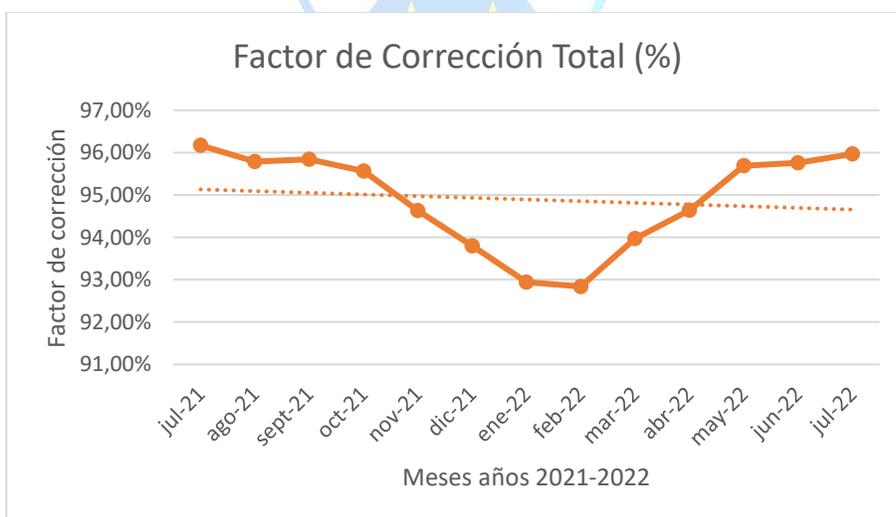


Figura 5.9.13 “Porcentaje factor de corrección total de cada mes”

Fuente: “<http://www.climatologia.meteochile.gob.cl>”, Elaboración propia

Gracias a estos valores se puede obtener el valor de flujo máximo o mínimo como también un factor de corrección promedio desde Julio 2021 hasta Julio 2022.

En promedio hay un factor de corrección total de 0,9489 (94,89%), con respecto a los últimos 12 meses, esto quiere decir que existe una diferencia en el caudal de flujo de un 5,11% considerando en las variables las condiciones ambientales reales, con respecto a las ideales.

El factor de corrección total **máximo** fue en **julio 2021** con 0,9617 (96,17%).

El factor de corrección total **mínimo** fue en **febrero 2022** con 0,9284 (92,84%).

El factor total de corrección **promedio** en el último año es de 0,9489 (94,89%).

A continuación, se desarrolla una tabla indicando los 3 meses en que el factor de corrección fue el total máximo (Tabla 5.9.6) y los 3 en que fue el mínimo (Tabla 5.9.7) con respecto a los últimos 12 meses para calcular un promedio con respecto a estos.

Tabla 5.9.6 “Factor de corrección total máximo y mínimo”

3 valores FT máximo	3 valores FT mínimo
0,9617 (julio 2021)	0,9284 (febrero 2022)
0,9597 (julio 2022)	0,9294 (enero 2022)
0,9584 (septiembre 2021)	0,9380 (diciembre 2021)

Fuente: “Elaboración propia”

Tabla 5.9.7 “Factor de corrección promedio máx., mín., prom.”

PROM. FT MÁXIMO	PROM. FT MÍNIMO	PROM FT PROM
0,9599 (95.99%)	0,9319 (93.19%)	0,9489 (94,89%)

Fuente: “Elaboración propia”

Gracias a estos datos es posible calcular numéricamente los flujos de caudales máximos, mínimos y promedio, con respecto a los últimos 12 meses.

Considerando:

- Dadas las especificaciones técnicas dadas por el fabricante, se conoce que el flujo de caudal a potencia máxima es de 65 [lpm], haciendo alusión a litros por minutos (equivalente a $[\frac{L}{min}]$).
- Al factor total de corrección promedio en los últimos años se asignará como un factor parcial.
- Promedio del factor de corrección total máximo en los últimos 12 meses de 0,9599.
- Promedio del factor de corrección total mínimo en los últimos 12 meses de 0,9319.
- Promedio total de los factores de corrección (factor de corrección total promedio) en los últimos 12 meses de 0,9489.
- Los datos de las operaciones serán nominales, tomando en consideración las especificaciones técnicas de la pila, trabajando con su potencia máxima, cuyo caudal es 65 [lpm].

Asociando los datos se multiplicarán los factores de corrección por el flujo de la pila para la obtención de valores con respecto al promedio de flujo en cuanto a litros por minuto.

$$\text{Promedio Flujo} = \text{Factor de corrección} \cdot \text{Flujo Caudal de la pila} \quad (25)$$

$$\text{Promedio flujo máximo} = 0,9599 \cdot 65 \text{ [lpm]} = 62,39[\text{lpm}] \quad (26)$$

$$\text{Promedio flujo mínimo} = 0,9319 \cdot 65 \text{ [lpm]} = 60,57[\text{lpm}] \quad (27)$$

$$\text{Promedio flujo prom.} = 0,9489 \cdot 65 \text{ [lpm]} = 61,67[\text{lpm}] \quad (28)$$

Conociendo estos datos se puede determinar la cantidad de litros mínimos, máximos y promedio de H₂ requeridos para satisfacer las necesidades de consumo energético en kWh de la isla. Para ello se debe multiplicar dicho factor, en este caso se multiplicará por 60, así se obtiene la cantidad de consumo en litros de hidrógeno por hora.

$$\text{Promedio Flujo por hora} = \text{Promedio Flujo} \left[\frac{L}{min} \right] \cdot 60[\text{min}] \quad (29)$$

$$\text{Promedio flujo máximo por hora} = 62,39 \left[\frac{\text{L}}{\text{min}} \right] \cdot 60 [\text{min}] = 3.743,4 \text{ L} \quad (30)$$

$$\text{Promedio flujo mínimo por hora} = 60,57 \left[\frac{\text{L}}{\text{min}} \right] \cdot 60 [\text{min}] = 3.634,2 \text{ L} \quad (31)$$

$$\text{Promedio flujo prom. por hora} = 61,67 \left[\frac{\text{L}}{\text{min}} \right] \cdot 60 [\text{min}] = 3.700,2 \text{ L} \quad (32)$$

Se sabe que los paneles tienen una intermitencia 5.840 horas, equivalentes a 243 días. Multiplicando por la cantidad de horas, se puede calcular la cantidad en cuanto al consumo en litros de H₂ para satisfacer energéticamente dichas horas.

Para suplir la totalidad de 5.840 Horas sin funcionamiento:

$$\text{Flujo máximo} = 3.743,4\text{L} \cdot 5.840\text{Hrs} = 21.861.456 \text{ Litros de H}_2 \quad (33)$$

$$\text{Flujo mínimo} = 3.634,2\text{L} \cdot 5.840\text{Hrs} = 21.223.728 \text{ Litros de H}_2 \quad (34)$$

$$\text{Flujo prom.} = 3.700,2 \text{ L} \cdot 5.840\text{Hrs} = 21.609.168 \text{ Litros de H}_2 \quad (35)$$

Dado que 1 [L] de Hidrógeno tiene una densidad de 70,79 [kg/m³] lo que equivale a una masa de 0,0708 [kg] [42]. Se procede a realizar la respectiva conversión de unidades, para conocer las cantidades en kilogramos requeridos para la producción de energía necesaria para la isla.

Conversión a Kg de H₂ con respecto a las 5840 Horas sin funcionamiento.

–Flujo máximo = 21.861.456 L

1L → 0,0708[kg]

21.861.456 L → X [kg] = 1.547.791,1 [Kg] de H₂

–Flujo mínimo = 21.223.728 L

1L → 0,0708[kg]

21.223.728 L → X [kg] = 1.502.639,9 [Kg] de H₂

–Flujo promedio = 21.609.168 L

1L → 0,0708[kg]

21.609.168 L → X [kg] = 1.529.929,1 [Kg] de H₂

Con respecto a los últimos 12 meses el flujo de hidrógeno en unidades de kilogramos promedio necesario para solventar el consumo energético es de 1.529.929,1 $\left[\frac{Kg}{Año}\right]$.

Recopilando los datos anteriores asociados a nuestros cálculos, para satisfacer energéticamente las 5.840 horas totales de intermitencia con respecto a los paneles solares se construyó la siguiente tabla.

Tabla 5.9.8 “Consumo kg de H₂”

Consumo máx. en kg de H₂	1.547.791,1 [kg]
Consumo mín. en kg de H₂	1.502.639,9 [kg]
Consumo prom. en kg de H₂	1.529.929,1 [kg]

Fuente: “Elaboración propia”

Tomando en consideración que para producir 1 [kg] de H₂ se necesita un consumo promedio de 55 [kWh]. Se procede a realizar las siguientes operaciones matemáticas para las respectivas conversiones, con el fin de obtener los distintos consumos energéticos de H₂ con respecto a los kg, en unidades de [kWh].

Para el consumo máx.: 1.547.791,1 [kg]	
1 kg de H ₂ → 55[kWh]	
1.547.791,1 [kg] → X[kWh] =	85.128.510,5 [kWh]
Para el consumo mín.: 1.502.639,9 [kg]	
1 kg de H ₂ → 55[kWh]	
1.502.639,9 [kg] → X [kWh]	82.645.194,5 [kWh]
Para el consumo prom.: 1.529.929,1 [Kg]	
1 kg de H ₂ → 55[kWh]	
1.529.929,1 [kg] → X [kWh]	84.146.100,5 [kWh]

Los resultados obtenidos, hacen mención del consumo necesario en [kWh] para la producción de kilos de H₂ según corresponda. En este caso se considerará como consumo total, el valor máximo, es decir el equivalente a 85.128.510,5 [kWh].

Se definirá el consumo parcial como la cantidad de horas continuas en que no estén en funcionamiento los paneles FV. Para conocer dicho dato se construyó la Tabla 5.9.9 con datos obtenidos desde un archivo Excel, el cual indica la cantidad de horas continuas sin funcionamiento con respecto a cada mes durante un año.

Tabla 5.9.9 “Cantidad de horas y días sin funcionamiento de los paneles FV”

Meses	Horas continuas sin funcionamiento (Hrs.)	Cantidad días del mes	Total, horas sin funcionamiento (Hrs.)
Enero	9	31	279
Febrero	10	28	280
Marzo	11	31	341
Abril	13	30	390
Mayo	14	31	434
Junio	15	30	450
Julio	15	31	465
Agosto	15	31	465
Septiembre	13	30	390
Octubre	12	31	372
Noviembre	10	30	300
Diciembre	10	31	310

Fuente: “Elaboración propia

La Tabla anterior, está representada por el gráfico mostrado a continuación:

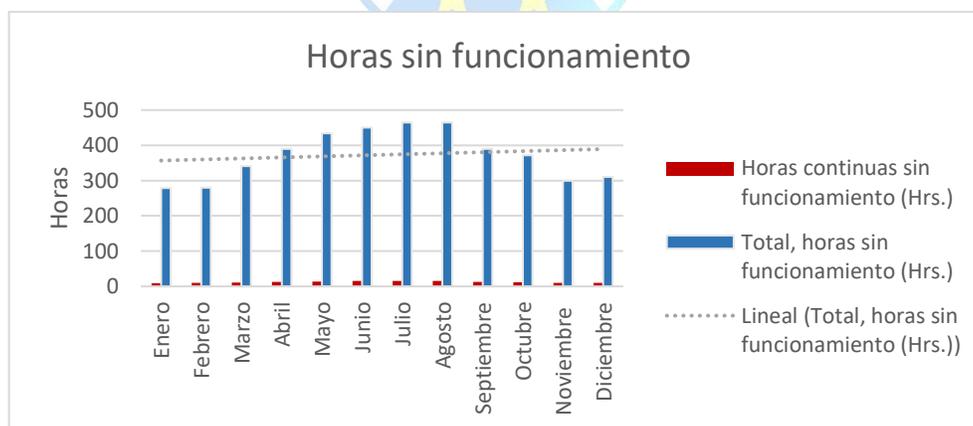


Figura 5.9.14 “Cantidad de horas continuas y totales mensuales sin funcionamiento de los paneles FV”

Fuente: “Elaboración propia”

El valor máximo y a su vez más repetitivo es de 15 horas, por ende, este será nuestro consumo parcial (horas continuas en que no los paneles solares no están en funcionamiento).

Asociando esto se tiene que:

La cantidad de Litros de H₂ necesarios para solventar 15 hrs continuas sin funcionamiento.

$$\text{Flujo máximo} = 3.743,4\text{L} \cdot 15 \text{ h} = 56.151 \text{ Litros de H}_2 \quad (36)$$

$$\text{Flujo mínimo} = 3.634,2\text{L} \cdot 15 \text{ h} = 54.513 \text{ Litros de H}_2 \quad (37)$$

$$\text{Flujo prom.} = 3.700,2 \text{ L} \cdot 15 \text{ h} = 55.503 \text{ Litros de H}_2 \quad (38)$$

Conversión [L] a [kg] de H₂ con respecto a las 15 Horas continuas sin funcionamiento.

–Flujo máximo = **56.151 L**

1L → 0,0708[kg]

56.151 L → X [kg] =

3.975,5 [kg] de H₂

–Flujo mínimo = **54.513 L**

1L → 0,0708[kg]

54.513 L → X [kg] =

3.859,5 [kg] de H₂

–Flujo promedio = **55.503 L**

1L → 0,0708[kg]

55.503 L → X [kg] =

3.929,6 [kg] de H₂

Ya sabiendo la cantidad de kg requeridos, se procede a realizar las conversiones para tener valores en función al consumo energético requerido para la producción de H₂ en unidades de [kWh]. Obteniendo lo siguiente:

Conversión [Kg] a [kWh] de H₂ con respecto a las 15 Horas continuas sin funcionamiento.

Para el consumo máx.: 3.975,5 [kg]

1 kg de H₂ → 55[kWh]

3.975,5 [kg] → X [kWh] = 218.652,5 [kWh]

Para el consumo mín.: 3.859,5 [Kg]

1 kg de H₂ → 55[kWh]

3.859,5 [kg] → X [kWh] 212.272,5 [kWh]

Para el consumo prom.: 3.929,6 [Kg]

1 kg de H₂ → 55[kWh]

3.929,6 [kg] → X [kWh] 216.128 [kWh]

Por lo tanto, hablando en términos de energía y basándonos en el valor máximo, para la producción del consumo parcial con respecto a los [kg] de H₂ se requieren 218.652,5 [kWh], como perfil diario.

Al multiplicar por los 365 días del año, da una cantidad de 79.808.162,5 [kWh] de consumo para así solventar un año las horas sin funcionamiento de los paneles FV.

Con los datos recopilados, se tiene que:

Tabla 5.9.10 “Consumo en kWh para 15 horas continuas sin funcionamiento de los paneles FV”

Consumos en kWh	
Consumo Total (anual)	79.808.162,5
Consumo promedio (mensual)	6.650.680,2
Consumo Parcial (diario)	218.652,5

Fuente: “Elaboración propia

Litros de agua para el consumo total (79.808.162,5[kWh]):

1kg de H₂ → 11L de agua

1.451.057,5 [Kg] H₂ → X [L de agua] = **15.961.632,5 litros de agua**

Litros de agua para el consumo parcial (218.652,5[kWh]):

1kg de H₂ → 11L de agua

3.975,5 [kg] → X [L de agua] = **43.730,5 litros de agua**

Litros de agua para el consumo promedio mensual (6.650.680,2 [kWh]):

1kg de H₂ → 11L de agua

120.921,4 [kg] → X [L de agua] = **1.330.136,04 litros de agua**

A lo anterior, visto en la Tabla 5.9.10 se le sumará la cantidad de consumo que la isla requiere.

Tabla 5.9.11 “Consumo en kWh total”

Consumos en kWh	
Consumo Total (anual)	80.028.343,5
Consumo promedio (mensual)	6.669.028,6
Consumo Parcial (diario)	219.255,7

Fuente: “Elaboración propia

Dado que ahora se sabe el consumo energético es posible calcular la cantidad de paneles solares necesarios para satisfacer las necesidades de la isla. Para ello se desarrolla la siguiente regla:

Si se utilizan 164 paneles para el consumo actual de la isla de 220.181 [kWh].

Para el consumo promedio mensual:

$$164 \text{ paneles} \rightarrow 220.181 \text{ [kWh]} \quad (39)$$

$$X \text{ paneles} \rightarrow 6.669.028,6 \text{ [kWh]} = 4.967,4 \approx 4.968 \text{ paneles} \quad (40)$$

Para el consumo parcial:

$$164 \text{ paneles} \rightarrow 220.181 \text{ [kWh]} \quad (41)$$

$$X \text{ paneles} \rightarrow 219.255,7 \text{ [kWh]} = 163,3 \approx 164 \text{ paneles} \quad (42)$$

Tabla 5.9.12 “Cantidad de paneles a utilizar por cantidad de consumo en kWh”

Consumos en kWh	Cantidad de paneles a utilizar
80.028.343,5	59.861
6.669.028,6	4.968
219.255,7	164

Fuente: “Elaboración propia

Con respecto al cálculo de cantidad de inversores de potencia para el uso de 164 necesitábamos una cantidad de 16 inversores por lo que para el consumo parcial y total necesitamos:

$$164 \text{ paneles} \rightarrow 16 \text{ inversores} \quad (43)$$

$$4.968 \text{ paneles} \rightarrow X \text{ inversores} \quad (44)$$

$$164 X = 79.488 \text{ inversores} \quad (45)$$

$$484,7 \approx 485 \text{ inversores} \quad (46)$$

Tabla 5.9.13 “Cantidad de inversores a utilizar según la cantidad de paneles para el consumo parcial y total”

Cantidad de paneles	Cantidad de inversores
59.861	5.841
4.968	485
164	16

Fuente: “Elaboración propia

Para operar los resultados con respecto a los factores de corrección se requiere convertir dichas cantidades de hidrógeno a litros de agua, sabiendo que para producir 1 [kg] de Hidrógeno se requieren 10-12 [L] de agua [70].

Se procede a convertir:

$$1[\text{kg}] \rightarrow 55[\text{kWh}] \quad (47)$$

$$X [\text{kg}] \rightarrow 220.181 [\text{kWh}] \quad (48)$$

$$4.003,2 [\text{kg}] \text{ (kg de H}_2 \text{ actual isla)} \quad (49)$$

$$220.181 [\text{kWh}] \rightarrow 56.543,7 \text{ L de H}_2 \text{ (Para el consumo actual isla)} \quad (50)$$

Respecto al caudal del aire el fabricante especifica que la pila opera en rangos de 100-500 [lpm], teniendo nuestro máximo y mínimo se multiplica este valor por los factores de corrección calculados con anterioridad, quedando:

Con respecto al caudal mínimo de aire especificado por el fabricante (100lpm).

$$\text{Factor de corrección flujo máximo de aire} = 0,9599 \cdot 100 \text{ [lpm]} = 95,99 \text{ [lpm]} \quad (51)$$

$$\text{Factor de corrección flujo mínimo de aire} = 0,9319 \cdot 100 \text{ [lpm]} = 93,99 \text{ [lpm]} \quad (52)$$

$$\text{Factor de corrección flujo prom. de aire} = 0,9489 \cdot 100 \text{ [lpm]} = 94,89 \text{ [lpm]} \quad (53)$$

Con respecto al caudal máximo de aire especificado por el fabricante (500lpm)

$$\text{Factor de corrección flujo máximo de aire} = 0,9599 \cdot 500 \text{ [lpm]} = 479,95 \text{ [lpm]} \quad (54)$$

$$\text{Factor de corrección flujo mínimo de aire} = 0,9319 \cdot 500 \text{ [lpm]} = 465,95 \text{ [lpm]} \quad (55)$$

$$\text{Factor de corrección flujo prom. de aire} = 0,9489 \cdot 500 \text{ [lpm]} = 474,45 \text{ [lpm]} \quad (56)$$

Tabla 5.9.14 “Promedios Factor de corrección”

Prom. Factor de corrección total	Prom. Factor de corrección mínimo	Prom. Factor de corrección máximo
284,67	94,89	474,45

Fuente: “Elaboración propia”

En base a estos resultados es posible calcular la cantidad con respecto al a estos factores y a las 15 horas sin funcionamiento continuo de los paneles utilizando el factor máximo de corrección.

$$\text{Prom. factor de corrección flujo máximo de aire} \cdot 60 \text{ [min]} \quad (57)$$

$$474,45 \cdot 60 = 28.467 \text{ litros por Hora} \cdot 15 = 427.005 \text{ Litros} \quad (58)$$

$$\text{Factor de corrección flujo máximo de aire } 0,9599 \cdot 500 \text{ [lpm]} = 479,95 \text{ [lpm]} \quad (59)$$

$$479,45 \cdot 60 = 28.767 \text{ litros por Hora} \cdot 15 = 431.505 \text{ Litros} \quad (60)$$

Si se hace una comparación entre los factores de corrección de los últimos 12 meses con respecto a los flujos mínimos y máximos del sistema, en base a los cálculos se obtiene lo siguiente, con respecto a la Tabla 5.9.7, vista con anterioridad sobre los factores de corrección se realizan las operaciones:

$$\text{Prom. FT máximo} \cdot \text{Flujo mínimo} = 0,9599 \cdot 65 \text{ [lpm]} = 62,39 \text{ [lpm]} \quad (61)$$

$$\text{Prom. FT máximo} \cdot \text{Flujo máximo} = 0,9599 \cdot 500 \text{ [lpm]} = 479 \text{ [lpm]} \quad (62)$$

$$\text{Prom. FT mínimo} \cdot \text{Flujo mínimo} = 0,9319 \cdot 65 \text{ [lpm]} = 60,57 \text{ [lpm]} \quad (63)$$

$$\text{Prom. FT mínimo} \cdot \text{Flujo máximo} = 0,9319 \cdot 500 \text{ [lpm]} = 465,95 \text{ [lpm]} \quad (64)$$

$$\text{Prom FT prom} \cdot \text{Flujo mínimo} = 0,9489 \cdot 65 \text{ [lpm]} = 61,64 \text{ [lpm]} \quad (65)$$

$$\text{Prom FT prom} \cdot \text{Flujo máximo} = 0,9489 \cdot 500 \text{ [lpm]} = 474,2 \text{ [lpm]} \quad (66)$$

Así se pudo obtener la diferencia de litros por minutos entre caudales máximos y mínimos en base a todo el sistema. Cabe mencionar que todos los valores utilizados para las respectivas operaciones son en base al último año y las especificaciones dadas por el fabricante.

El resumen de los datos obtenidos se expresará en la siguiente tabla:

Tabla 5.9.15 “Promedios Consumos”

	[kWh]	[L] de H ₂	[kg] de H ₂
Consumo Total	80.028.343,5	16.005.668,7	1.455.060,8
Consumo mensual	6.669.028,6	1.333.805,7	121.255,1
Consumo parcial	219.255,7	43.851,1	3.986,5

Fuente: “Elaboración propia”

5.9.5 Proyección del Consumo

Con los datos obtenidos con anterioridad se puede realizar una gráfica de tendencia con respecto al comportamiento a su proyección en 20 años.

Sabiendo que el país tiene una tasa de crecimiento promedio anual de un 2,38%, y por lo demás se espera que para el 2040 el Sistema Eléctrico Nacional tenga un aumento de un 60% [71].

El crecimiento energético en Chile va asociado al creciente desarrollo económico por lo que se espera que el consumo energético tenga una tasa de crecimiento de un 5% en años posteriores [72].

Se hará una tabla de Excel con los datos recolectados y se creará un gráfico con ellos.

Tabla 5.9.16 “Proyección 2017-2040, Tasa del 2% anual”

	Años	Consumo KWh	[L] de H ₂	[kg] de H ₂	Tasa de crecimiento
1	2017	220181	16005669	1455061	2%
2	2022	225421	16386604	1489691	
3	2023	230786	16776605	1525146	
4	2024	236279	17175888	1561444	
5	2025	241902	17584674	1598607	
6	2026	247660	18003189	1636654	
7	2027	253554	18431665	1675606	
8	2028	259589	18870339	1715485	
9	2029	265767	19319453	1756314	
10	2030	272092	19779256	1798114	
11	2031	278568	20250002	1840909	

12	2032	285198	20731952	1884723
13	2033	291986	21225373	1929579
14	2034	298935	21730537	1975503
15	2035	306049	22247723	2022520
16	2036	313333	22777219	2070656
17	2037	320791	23319317	2119938
18	2038	328426	23874317	2170392
19	2039	336242	24442526	2222048
20	2040	344245	25024258	2274933

Fuente: “Elaboración propia”

Dada la Tabla de Proyección con una Tasa de crecimiento del 2% anual podemos visualizar la siguiente gráfica:

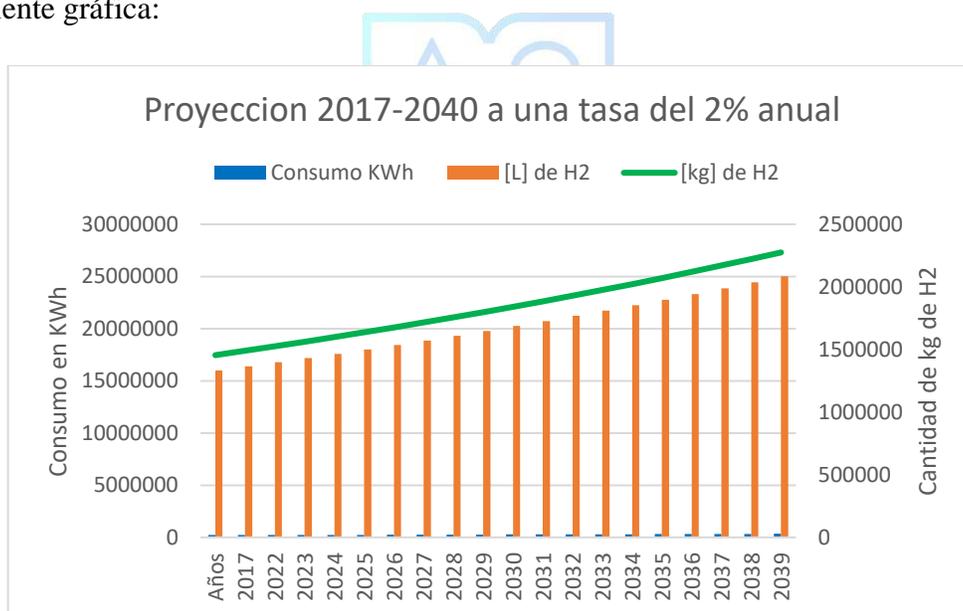


Figura 5.9.15 “Gráfica Proyección 2017-2040 a una tasa del 2% anual”

Fuente: “Elaboración propia”

Tabla 5.9.17 “Proyección 2017-2040, Tasa del 5% anual”

	Años	Consumo KWh	[L] de H2	[kg] de H2	Tasa de crecimiento
1	2017	220181	16005669	1455061	5%
2	2022	231190	16805952	1527814	
3	2023	242750	17646250	1604205	
4	2024	254887	18528562	1684415	

5	2025	267631	19454990	1768635
6	2026	281013	20427740	1857067
7	2027	295064	21449127	1949921
8	2028	309817	22521583	2047417
9	2029	325308	23647662	2149788
10	2030	341573	24830045	2257277
11	2031	358652	26071548	2370141
12	2032	376584	27375125	2488648
13	2033	395413	28743881	2613080
14	2034	415184	30181075	2743734
15	2035	435943	31690129	2880921
16	2036	457740	33274636	3024967
17	2037	480628	34938367	3176215
18	2038	504659	36685286	3335026
19	2039	529892	38519550	3501777
20	2040	556386	40445528	3676866

Fuente: “Elaboración propia”

Dada la Tabla de Proyección con una Tasa de crecimiento del 5% anual podemos visualizar la siguiente gráfica:

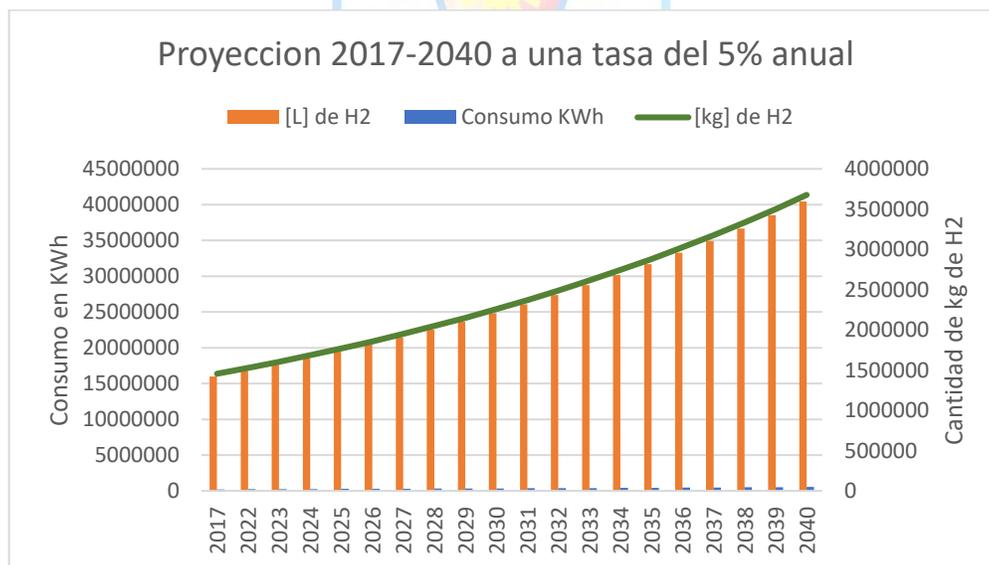


Figura 5.9.16 “Gráfica Proyección 2017-2040 a una tasa del 5% anual”

Fuente: “Elaboración propia”

Para el caso de proyección hasta el año 2040 con una tasa de un 2,38% se logra apreciar que su comportamiento es directamente proporcional por así decirlo, con el pasar de los años mayor será el consumo en [kWh] con respecto a la cantidad de H₂ producido, mientras que se aprecia que la cantidad de litros de H₂ no sube en proporción a estas variables

Para el caso de proyección hasta el año 2040 con una tasa de un 5% se logra apreciar que su comportamiento tiene una tendencia más exponencial, con el pasar de los años mayor será el consumo en [kWh] con respecto a la cantidad de H₂ producido, mientras que al igual que en el caso con una tasa de crecimiento de 2,38%, la cantidad de litros de H₂ no sube en la misma proporción.

5.9.6 Ejemplificación de consumo Hidrógeno y Diesel

Finalmente, para los cálculos relacionados al hidrógeno vamos a ejemplificar el consumo requerido en un automóvil para lograr dar la vuelta al mundo (km). Sabiendo que la circunferencia de la tierra es de aproximadamente 40.075 [km] cruzando linealmente por la línea del Ecuador y que con 5[kg] de H₂ se logra una autonomía de 550[km] en un automóvil. Se puede calcular la cantidad de kilos de Hidrógeno que necesita un automóvil para lograr dar la vuelta al mundo.

5kg Hidrógeno → 550 km

x kg de Hidrógeno → 40.075 km

$$\frac{(5 \text{ Kg})(40.075 \text{ Km})}{(550 \text{ km})} = 364,318 \approx 364 \text{ kg de H}_2$$

Son necesario 365 kg de H₂ para lograr dar autonomía de 40.075 en un automóvil. Esta cantidad se puede transformar fácilmente a litros y kilos de combustibles fósiles para obtener una comparación con respecto a este caso.

1kg de H₂ → 6,5 litros de gasolina (4,7[kg])

365kg de H₂ → x litros de gasolina

$$(365)(6,5) = 2.372,5 \text{ L de gasolina}$$

1kg de H₂ → 4,7 kg gasolina

365kg de H₂ → x kg de gasolina

(365)(4,7) = 1.715,5kg de gasolina

Por ende 365 kilos de Hidrógeno equivalen a 1.715,5 kg (2.372,5 L) de Gasolina.

El mismo cálculo se puede realizar, pero esta vez para calcular la equivalencia con respecto al diésel.

11 kg de H₂ → 50 litros de diésel (42[kg])

365 kg de H₂ → x litros de diésel

$\frac{(365 \text{ kg})(50 \text{ L})}{(11 \text{ Kg})} = 1.659,09 \approx 1660 \text{ L de diésel}$

11 kg de H₂ → 42 kg

365 kg de H₂ → x kg de diésel

(365)(42) = 1.393,6 kg de gasolina

Por lo tanto 365 kilos de Hidrógeno equivalen a 1.393,6 kg (1660 L) de Diésel.

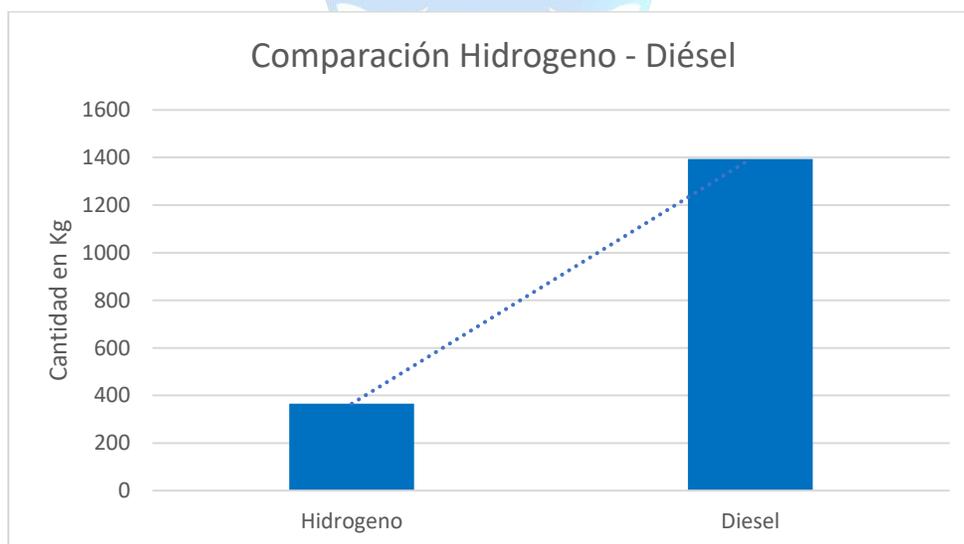


Figura 5.9.17 “Comparación cantidad en kilos de Hidrógeno y Diesel”

Fuente: “Elaboración propia”

En este gráfico se aprecia visualmente la comparación en kg del hidrógeno con respecto a otros combustibles fósiles como el Diesel.

Los combustibles fósiles ocupan una mayor cantidad de kg con respecto a su consumo. Por ende, en base a esta gráfica se puede decir que el Diesel Tiene una equivalencia en kg con respecto a los kg de H₂ de 3,8 veces mayor.

Considerando aspectos como la densidad, volumen, espacio, peso, entre otros, el H₂V tiene amplia ventaja por sobre los otros tipos de combustibles.

5.10 Conclusiones

Con lo que se estudió anteriormente, se concluye que para producir la cantidad de energía mensual promedio de 6.669.028,6 [kWh] para las horas con y sin funcionamiento de los paneles, se necesitarán un total de 4.968 paneles solares FV. Por otro lado, 6 pilas de combustible de 5[kW] bastarían para solventar la gran intermitencia que hay con respecto a las 5810Hrs sin accionamiento de los paneles FV. Las pilas solo funcionarán cuando no funcionen estos, es decir que mientras estas no operan, de igual manera se tendrá producido el H₂ para suplir energéticamente la isla.

En temas de consumo hídrico se recalca que el consumo es mínimo, comparando proporcionalmente el consumo a nivel país o familia durante un año.

Otro punto de gran relevancia es que las pilas tienen la facultad de producir agua, en este caso la cantidad de litros por [kWh] de H₂ no estaba especificado por el fabricante, pero no es un dato menor, ya que el hecho que una pila tenga producción de H₂O favorece en todo aspecto el estudio, tanto en recursos como en economía, es decir que el consumo asociado a litros de H₂, debería ser menor.

A su vez Chile es un país lleno de costas, rodeado de mar, por ende es una gran oportunidad para satisfacer dicha necesidad aprovechando nuestros recursos como país. Una familia de 5 personas consume en promedio 25.000 litros de agua potable al mes, es decir 300.000 litros al año aproximadamente, mientras que el consumo como país es de 166 mil millones de m³/año. Si se compara dicha cifra con los 16.005.668,7 litros de agua que se requieren al año para solventar la totalidad de horas sin funcionamiento energéticos en los paneles, se aprecia que la diferencia es gigantesca.

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

6.1 Introducción

La evaluación económica del proyecto permite saber algunos beneficios y desventajas de la implementación de este. En este capítulo se realizarán cotizaciones y cálculo de costos de los componentes necesarios para la instalación de nuestra granja fotovoltaica y para la producción de hidrógeno.

6.2 Cotización equipos utilizados en el proyecto

En el capítulo anterior se efectuó un análisis del consumo diario, mensual y anual, se realizará la cotización de nuestros equipos con respecto a estas dos condiciones. La cotización estará realizada en dólares (USD\$).

- Panel solar

Se cotizó en la página web de la empresa ESOL el Panel Solar FV que se usará es el” Dah 450 Watt Perc, Mono Half Cell, módulo DHM-72L9”. Se declaró una cantidad para el consumo diario, mensual y anual una cantidad de 164, 4.968 y 59.861 paneles solares FV respectivamente, según los cálculos realizados en el capítulo anterior. El precio unitario de cada panel FV asciende los 238 dólares (USD \$).

Tabla 6.2.1 “Cotización panel solar para consumo diario/kWh”

Modelo Panel Solar	DAH Solar DHM-72L9
Valor (USD \$)	\$238
Cantidad de paneles	164
Valor Total	\$38.998

Fuente: “Elaboración propia”

Tabla 6.2.2 “Cotización panel solar para consumo promedio mensual/kWh”

Modelo Panel Solar	DAH Solar DHM-72L9
Valor (USD \$)	\$238
Cantidad de paneles	4.968
Valor Total	\$1.181.358

Fuente: “Elaboración propia”

Tabla 6.2.3 “Cotización panel solar para consumo anual/kWh”

Modelo Panel Solar	DAH Solar DHM-72L9
Valor (USD \$)	\$238
Cantidad de paneles	59.861
Valor Total	\$14.234.554

Fuente: “Elaboración propia”

Al efectuar el cálculo de costos de los 3 tipos de consumos, se puede ver que al realizarlos con respecto al consumo anual obtendremos un precio bastante alto con respecto a los otros, esto a causa del número de paneles a utilizar. Según estudios y evaluaciones técnicas para plantas fotovoltaicas el perfil de consumo se determinará a través del diario/mensual, por lo que para el cálculo de gastos totales del proyecto se tomarán estos dos perfiles.

- Inversor

Se cotizó en la página web de la empresa ESOL el Inversor de corriente que se usará es el “EPEVER NP5000-42”. De igual forma que el panel se declaró para la cantidad de consumo diario, mensual y anual, dando un total de 16, 485 y 5.841 inversores de corriente, a un precio de 927 dólares (USD \$) de forma unitaria.

Tabla 6.2.4 “Cotización inversor para consumo mensual/kWh”

Modelo inversor	EPEVER-inversor NP5000-42
Valor (USD \$)	\$927
Cantidad de inversores	485
Valor Total	\$449.457

Fuente: “Elaboración propia”

Tabla 6.2.5 “Cotización inversor para consumo promedio diario/kWh”

Modelo inversor	EPEVER-inversor NP5000-42
Valor (USD \$)	\$927
Cantidad de inversores	16
Valor Total	\$14.827

Fuente: “Elaboración propia”

Tabla 6.2.6 “Cotización inversor para consumo anual/kWh”

Modelo inversor	EPEVER-inversor NP5000-42
Valor (USD \$)	\$238
Cantidad de inversores	5841
Valor Total	\$1.388.952

Fuente: “Elaboración propia”

Al igual que la observación del cálculo de paneles, se tomarán en cuenta el perfil diario/mensual.

- Pila de combustible

Se hizo la cotización de la pila de combustible en FuelCellEarth, por la Pila de Combustible “Horizon H-5000 PEM Fuel Cell”. Se declaró una cantidad de 6 pilas a utilizar, las cuales fueron evaluadas en el capítulo anterior, cada una de ellas tiene un precio de 26.800 dólares (USD \$).

Tabla 6.2.7 “Pila de combustible”

Modelo Pila de combustible	Horison H-5000 PEM Fuel Cell
Valor (USD \$)	\$26.800
Cantidad de pilas	6
Valor Total	\$160.800

Fuente: “Elaboración propia”

- Tanque almacenamiento de Hidrógeno

Se cotizó el Tanque de almacenamiento de Hidrógeno en la página web es.made-in-china.com como “Bombona de gas tanque de almacenamiento horizontal de 5m3-500M3”, por un precio en dólares de US\$18.888.

Para averiguar la cantidad de tanques que se utilizarán simplemente se convirtió el consumo promedio mensual de litros de agua (120.921,5 [L]) a metros cúbicos, con la finalidad de adaptarse al estanque que se estimará más conveniente.

Sabiendo que:

$$1 \text{ L} \rightarrow 0,001 \text{ [m}^3\text{]} \quad (68)$$

$$120.921,5 \text{ L} \rightarrow 120,92 \text{ [m}^3\text{]} \quad (69)$$

El objetivo de convertir dichos litros a unidades de metros cúbicos fue para encontrar el tanque más conveniente con respecto a su capacidad máxima. En este caso la capacidad del estanque escogido fue de 500[m³]. Por ende:

$$\frac{120,92 \text{ [m}^3\text{]}}{500 \text{ [m}^3\text{]}} = 0,24 \approx 1 \quad (70)$$

Es decir, aproximadamente se necesitarán 1 estanque para almacenar la totalidad de litros de agua consumida para abastecer energéticamente la isla de forma mensual.

Tabla 6.2.8 “Tanque de almacenamiento de Hidrógeno”

Tanque de almacenamiento H2	
Valor (USD \$)	\$19.000
Cantidad de tanques	1
Valor Total	\$19.000

Fuente: “Elaboración propia”

6.3 Costo parcial del proyecto

Según las cotizaciones vistas con anterioridad, el cálculo de costos parciales para el consumo promedio mensual de la isla nos da un total necesario de inversión parcial de \$1.400.156 USD. Mientras que con respecto a los costos parciales para el consumo diario nos da un total de inversión parcial de \$233.625 USD.

Tabla 6.3.1 “Costos parciales, Perfil Mensual de la isla”

Producto	Cotización Consumo Mensual de la Isla
Panel Solar	\$1.181.358
Inversor	\$38.998
Pila de Combustible	\$160.800
Tanque de almacenamiento	\$19.000
Total	\$1.400.156

Fuente: “Elaboración propia”

Tabla 6.3.2 “Costos parciales, Perfil Diario de la isla”

Producto	Cotización Consumo Diario de la Isla
Panel Solar	\$38.998
Inversor	\$14.827
Pila de Combustible	\$160.800
Tanque de almacenamiento	\$19.000
Total	\$233.625

Fuente: “Elaboración propia”

6.4 Conclusiones

Como alcance de esta sección del Trabajo de Título, se destaca que solo se ha dado énfasis a los productos necesarios para realizar parte de la instalación, ignorando costos asociados a la instalación, mano de obra, mantención y limpieza, además del traslado de todo esto hasta la isla, entre otros aspectos a considerar en un proyecto. Por lo demás, se desconocen los beneficios económicos a largo plazo para la empresa encargada del Servicio Eléctrico en la zona.

Con respecto al costo parcial del proyecto, es sabido que cualquier proyecto con almacenamiento de hidrógeno tendrá costos elevados debido a su precio de mercado actual.

Aunque los costos asociados a este tipo de fuentes de producción energética y de almacenamiento de ella son elevados, debemos tomar en cuenta los impactos positivos que tendrán estas a futuro con respecto a la huella de carbono, que trae consigo el cambio climático.



CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

7.1 Sumario

En este Trabajo de Título por parte de los alumnos de Ingeniería Civil en Automatización se realizó la “Evaluación técnica de la implementación de una granja solar para el suministro de energía eléctrica a la Isla Mocha, utilizando hidrógeno verde como fuente de almacenamiento”.

En el Capítulo 1, se aborda la problemática de la isla, y como el uso de diésel daña al medio ambiente y produce contaminación, legislación y normativas, terminando con la hipótesis.

En el Capítulo 2, se profundiza en el tema de energías renovables específicamente la Energía Solar FV. En esta se realiza un estudio teórico acerca de la Energía Solar en el país, los elementos fotovoltaicos y tipos de instalaciones.

En el Capítulo 3, se profundizó en el tema del Hidrógeno Verde, su implementación teórica, ventajas, impactos, almacenamiento, además del Hidrógeno Verde en nuestro país. Por lo demás, se abordaron dos temas de gran importancia para la implementación de este que es la electrólisis y las celdas de combustibles.

En el Capítulo 4, nos centramos en la Isla Mocha y sus condiciones climáticas. Se centró en su Sistema Eléctrico, como las condiciones climáticas afectan el rendimiento FV, la propuesta de posicionamiento de los paneles FV, además de un cálculo final de emisiones de CO₂ que se producen actualmente.

En el Capítulo 5, se realizó un Estudio del Consumo en kW con respecto a la Isla. En ella se evaluó la cantidad de paneles, inversores y pilas de combustibles a usar para poder generar la potencia total necesaria, tanto para el recurso solar como para el almacenamiento de hidrógeno. Finalizando con la proyección a 20 años del consumo total y su almacenamiento de energía.

En el Capítulo 6, Se realizó una Evaluación Económica simple, de las cotizaciones de los productos a necesitar para el proyecto.

7.2 Conclusiones

En este punto se busca orientar al país para lograr un mejor desarrollo en esta industria, para lo cual se ha generado la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en Chile.

En este plan se proponen los pasos para llegar a lograr llevar a cabo dicha estrategia y se establecen también metas que propulsarían a ser líderes en este ámbito.

Entre sus principales metas, están:

- Convertirse para el 2030, en el principal y más barato productor de hidrógeno verde a nivel mundial.
- Ser el productor más barato de este recurso y contar con 5 GW de capacidad de electrólisis hasta el 2025.
- Impacto ambiental, reducir a cero las emisiones de CO₂.

Con respecto a la parte económica del proyecto, se puede apreciar que, para el consumo parcial, los gastos asociados son relativamente bajos, mientras que, para solventar el consumo total, los gastos son considerablemente más altos. Realizando una sumatoria de todos los gastos en combustibles fósiles más los gastos asociados al transporte de este para abastecer intermitentemente la isla, por cada año es una cifra sumamente elevada, por ende, si se toma en consideración la inversión a largo plazo que sería la granja solar, habría un ahorro considerable con respecto a gastos y materia prima.

Asociando el consumo energético con respecto a litros de agua requeridos, se puede apreciar una suma considerablemente baja, incluso proyectándola a 20 años, subiendo la tasa de crecimiento a 5% o manteniéndola en 2,38%.

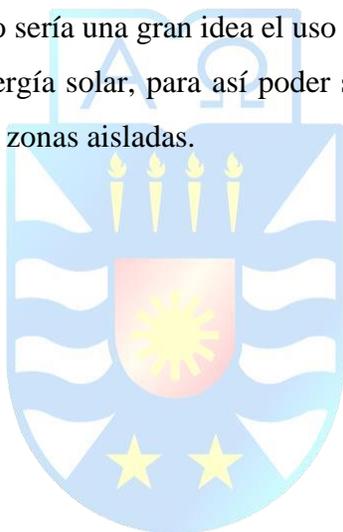
En resumen, podríamos decir que el uso de Hidrógeno pese a sus altos costos es factible, accesible, reduce costos a largo plazo. Aunque por otro lado el uso específico de paneles FV no es tan beneficioso, debido a la intermitencia de la radiación solar y la incertidumbre de esta, debido a las condiciones del clima y los distintos agentes externos.

7.3 Trabajos futuros

Este Trabajo de Título da hincapié a la realización de nuevos estudios y evaluaciones de proyectos fotovoltaicos para zonas remotas de nuestro país, ya que este tipo de proyectos basados en energías renovables traen consigo aspectos positivos tanto para la comunidad como para el medio ambiente de la zona. Además de que se hace interesante hacer comparaciones con respecto a otras ubicaciones que pasen por las mismas condiciones con respecto a su servicio eléctrico.

Se recomienda a futuro realizar un análisis de costos más exhaustivo, para así realizar un flujo de caja con pros y contras del proyecto para así más adelante llevar a cabo del segundo paso a seguir que sería la implantación de este.

Finalmente, como trabajo futuro sería una gran idea el uso de otras energías renovables para así complementar el uso de energía solar, para así poder sacar todo el provecho necesario para la extracción de energía de zonas aisladas.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] “Statistical Review of World Energy,” vol. 70th edition, 2021.
- [2] R. B. Cancino Silva, “Producción y almacenamiento hidrógeno verde para aplicaciones energéticas en Chile,” Universidad de Chile, Santiago, 2021.
- [3] G. de C. Ministerio de energía, “Sistema Electrico Aislado Isla Mocha,” Mar. 2019.
- [4] Superintendencia de electricidad y combustible (SEC), “Certificacion Instalacion electrica Isla Mocha,” 2018.
- [5] F. Reyes, “Garantizan servicio eléctrico en Isla Mocha: empresa a cargo llegó a acuerdo con Gobierno Regional,” *Radio Bio Bio*, Aug. 13, 2021.
- [6] Municipalidad de Lebu, “Informe Diagnostico Ambiental Institucional Proceso Certificacion Ambiental Municipalidad Lebu,” 2018.
- [7] E. y P.-B. del C. N. Departamento de Estudios, “Normativa aplicable a energía solar en Chile,” 2021.
- [8] Revista Electricidad, “INN elabora normas técnicas chilenas (NCh) para el fortalecimiento de la calidad en la industria fotovoltaica,” Aug. 2018.
- [9] Natalia Aziara Aguayo, “USO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN ISLA SANTA MARÍA PARA REDUCIR SU DEPENDENCIA DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES,” Universidad de Concepción, Concepción, 2018.
- [10] F. Posso, J. Acevedo, and J. Hernandez, “El impacto económico de las energías renovables. The economic impact of renewable energies,” *Aibi revista de investigación, Administracion e ingenieria*, vol. 2, pp. 22–26, 2014.
- [11] IEA, “Renewables 2021,” Dec. 2021.
- [12] IEA, “Report extract Renewable electricity,” 2021.
- [13] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Nuevo récord mundial de capacidad energética renovable en 2020,” Apr. 2021.

- [14] Corporacion de desarrollo tecnologico - Camara chilena de la construccion, “Diseño y dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos,” *Area de comunicacione, CDT*, vol. 37, 2013.
- [15] “Manual Explorador Solar”.
- [16] José Alfonso Alonso Lorenzo, “Radiación, Geometría, Recorrido óptico, Irradiancia y HSP,” *Sunfields Europe*, 2019.
- [17] R. Muñoz, “Energía Solar, un pilar del futuro energético de Chile,” *El Mostrador*, Jul. 2021.
- [18] C. Maldonado Caballero, “El boom de proyectos de energía solar en Chile impone nuevos desafíos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental,” *Pais Circular, Industria / Energía Fotovoltaica*, Apr. 2021.
- [19] D. Pilco and J. Jaramillo, “Sistemas fotovoltaicos para iluminación: paneles fotovoltaicos,” *Universidad Técnica Particular de Loja*, 2010.
- [20] A. Navarro, “Estudio de viabilidad tecnica y economica de una planta para la produccion diaria de 20 kg de hidrogeno verde con energia solar fotovoltaica,” 2020.
- [21] S. Torres Pacheco, F. Jurado Perez, D. Granados Lieberman, and A. Lozano Luna, “Efficiency in solar panels,” *Revista del Diseño Innovativo*, vol. 2, pp. 9–21, Mar. 2018.
- [22] Energya VM, “¿Que es un generador fotovoltaico?,” Dec. 01, 2021.
- [23] J. V. B. DANIEL CARTES HIDALGO, “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE SUMINISTRO, A TRAVÉS DE ERNC PARA COMUNIDAD AGRÍCOLA EN EL NORTE DE CHILE ,” Universidad del Bio Bio , Concepcion, Chile, 2014.
- [24] U. de C. Revista Urbanismo, “Sistemas fotovoltaicos en Arquitectura y Urbanismo,” 2005.
- [25] E. I. ECOLEED, “Instalaciones Fotovoltaicas Off Grid, aisladas Sin Conexión a la Red.”

- [26] Reporte Sostenible Chile, “Generadores solares para iluminación dejan atrás la era del diésel,” Oct. 2020.
- [27] Ah2V Biobio, “Manual del Hidrogeno Verde,” *Alianza Hidrogeno Verde*, 2021.
- [28] Brand Services, “Hidrógeno verde, azul, negro... Por qué es importante el ‘color’ para el futuro de la movilidad,” Feb. 21, 2021.
- [29] Gobierno de Chile Ministerio de energía, “Tecnologías del Hidrógeno y perspectivas para Chile,” 2019.
- [30] T. Molina and Emol, “Hidrógeno verde: Qué es, cómo se produce y cuál es su ‘impresionante’ potencial en Chile,” *Generadoras de Chile*, Jan. 2020.
- [31] Fundacion Chile, “Una oportunidad estrategica para Chile: Hidrogeno Verde,” 2020.
- [32] Bernoth2.es, “Primera planta de Hidrógeno Verde, España”.
- [33] Iberdrola, “El hidrógeno verde: una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta,” 2020.
- [34] Generadoras de Chile, “Hidrogeno Verde,” 2020.
- [35] Guia de energía Chile, “Asociación de la industria eléctrica y electrónica (AIE),” 2018.
- [36] Aleasoft Energy Forecasting, “El papel del hidrógeno en la carrera espacial y en la transición energética,” *El periodico de la energia* , Aug. 2019.
- [37] E. M. de energía Juan Carlos Jobet, “La industria del Hidrógeno Verde en Chile,” 2020.
- [38] Mundo Geo, “El Hidrógeno verde; Una alternativa para reducir las emisiones y cuidar el planeta,” 2020.
- [39] Latamgreen.com, “Cegas promueve la ruta del biogás hacia el hidrógeno verde,” 2021.
- [40] R. facultad de ingeniería universidad de antiaquia Redalyc, “Producción de Hidrógeno y nanotubos de Carbono,” 2019.

- [41] Induambiente, “Claves del Hidrógeno verde,” 2020.
- [42] Energia.gob.cl ministerio de energía., “Gobierno de Chile, Hidrógeno verde Electromovilidad y transporte terrestre.,” 2021.
- [43] G. de C. Ministerio de energía, “Inyección del Hidrógeno en redes de Gas natural,” 2020.
- [44] Induambiente.com, “Informe técnico, Claves del Hidrógeno verde,” 2020.
- [45] Lenntech Water Treatment Solutions, “La electrólisis y sus aplicaciones,” 2018.
- [46] Químicas.net, “La electrólisis y su proceso,” 2015.
- [47] IDEAGREEN, “IdeaGreen, «Hidrogeno Verde y sus tipos de canalizadores,”.
- [48] Ideagreen.com, “Hidrógeno verde y sus tipos de electrolizadores,” 2021.
- [49] Universidad de Chile, “Hidrógeno verde: el potencial de Chile para ser líder mundial en la producción del llamado combustible del futuro”.
- [50] Congreso Nacional, “Iniciativa ‘Hidrógeno Verde’ Comisión ‘Desafíos del Futuro, Ciencia Tecnología e Innovación’ del Senado de la República Documento final ,” Nov. 2020.
- [51] Sandro de Luca, “Hidrógeno verde en Chile: La oportunidad de ser lider en el mercado,” 2021.
- [52] Gobierno de Chile, “Estrategia Nacional Hidrógeno Verde,” 2020.
- [53] Juan Dixon R. y Eduardo Recordón Z., “Celdas de combustible: Una alternativa limpia para generación de energía eléctrica.,” 2020.
- [54] Revista Mundo Científico, “Pilas de combustible: Energía sin humos,” 2002.
- [55] Nicolás García Bernal Rafael Torres M. Enrique Vivanco F, “Desarrollo del mercado del Hidrógeno verde en Chile,” 2020.

- [56] Octavio Fabian Soto, “Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos para la obtención de Hidrógeno verde desde agua pura y salada,” 2020.
- [57] Cnh2.es Centro nacional de Hidrógeno, “Pilas de combustible,” 2020.
- [58] Glpautogas.com, “Estaciones de Hidrógeno en Estados Unidos 2021,” 2022.
- [59] Energia.gob.cl Ministerio de energía, “Hidrógeno verde, un proyecto país,” 2019.
- [60] Punta del saco, “Escapate a la isla mocha,” 2021.
- [61] Superintendencia de electricidad de combustible (SEC), “Certificacion instalacion electrica isla mocha,” *Ministerio de Energia*, Feb. 2019.
- [62] cuandovisitar.cl, “La Mocha Tiempo, clima y cuando visitar”.
- [63] cambioenergetico.com, “Como afectan los dias nublados a los paneles solares”.
- [64] Consultor de tecnologías Sost. Rodrigo Diaz, “Aplicaciones y beneficencias sociales que el Hidrógeno verde Ofrece a Chile.,” 2019.
- [65] Gero Rueter, “Power to X, ¿un sistema de energía totalmente renovable?,” *DW Español*, 2019.
- [66] R. M. Matías Garbarino, “Estudio de implementación de paneles fotovoltaicos aplicando algoritmos de control de máxima extracción de potencia en la Universidad del Bio Bio, sede Concepción,” Universidad del Bio Bio, Concepción, 2018.
- [67] Horizon.com fuell cell store., “Manual Ficha técnica pila de combustible FCS-5000 Horizon cell store. [43]”.
- [68] “meteochile.gob.cl.”
- [69] ReporteSostenible.cl, “El Hidrógeno verde y la escasez hídrica: Hay Agua para todos,” 2019.
- [70] Minería Chile, “Consumo del Sistema Electrico Nacional aumentaría 60% en los próximos 20 años,” Dec. 2020.

[71] Cesar Pasten, "Chile energía y desarrollo," Georgia, 2012.



ANEXO A: Registro de Radiación Solar Isla Mocha 2014-2016

Tabla A.0.1 “Registro Radiación Global 2016, en W/m²”

Radiación en W/m²	Total mensual	Promedio Mensual	Total anual	Promedio anual
Radiación Global Enero	220611,31	296,520578	1728581,97	199,5131544
Radiación Global Febrero	202472,05	301,2976935		
Radiación Global Marzo	199375,43	267,9777285		
Radiación Global Abril	137788,56	191,373		
Radiación Global Mayo	60345,53	81,10958333		
Radiación Global Junio	83128,95	115,456875		
Radiación Global Julio	60000,68	80,64607527		
Radiación Global Agosto	82927,07	111,4611156		
Radiación Global Septiembre	139994,38	194,4366389		
Radiación Global Octubre	161129,81	216,5723253		
Radiación Global Noviembre	192310,12	267,0973889		
Radiación Global Diciembre	188498,08	290,8920988		

Tabla A.0.2 “Registro Radiación Global 2016, en kWh/m²”

Radiación en kWh/m²	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Total mensual	5294,67144	4859,3292	4785,01032	3306,92544	1448,29272	1995,0948
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Total mensual	1440,01632	1990,24968	3359,86512	3867,11544	4615,44288	4523,95392
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Promedio Mensual	7,11649387	7,23114464	6,43146548	4,592952	1,94663	2,770965
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Promedio Mensual	1,93550581	2,67506677	4,66647933	5,19773581	6,41033733	6,98141037
Total anual	Promedio anual					
41485,96728	4,788315706					

Tabla A.0.3 “Registro Radiación Global 2015, en W/m²”

Radiación en W/m²	Total mensual	Promedio Mensual	Total anual	Promedio anual
Radiación Global Enero	231013,53	310,502056	1751825,41	200,5605677
Radiación Global Febrero	206896,63	307,88189		
Radiación Global Marzo	212232,85	285,259207		
Radiación Global Abril	121298,66	168,470361		
Radiación Global Mayo	71066,19	95,5190726		
Radiación Global Junio	53333,23	74,0739306		
Radiación Global Julio	47726,54	64,1485753		

Radiación Global Agosto	76486,19	102,804019
Radiación Global Septiembre	139606,58	193,898028
Radiación Global Octubre	189502,52	254,707688
Radiación Global Noviembre	184116,81	255,717792
Radiación Global Diciembre	218545,68	293,744194

Tabla A.0.4 “Registro Radiación Global 2015, en kWh/m2”

Radiación en kWh/m2	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Total mensual	5544,32472	4965,51912	5093,5884	2911,1678	1705,58856	1279,99752
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Total mensual	1145,43696	1835,66856	3350,55792	4548,0605	4418,80344	5245,09632
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Promedio Mensual	7,45204935	7,38916536	6,84622097	4,0432887	2,292457742	1,77777433
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Promedio Mensual	1,53956581	2,46729645	4,65355267	6,1129845	6,137227	7,04986065
Total anual	Promedio anual					
42043,80984	4,813453626					

Tabla A.0.5 “Registro Radiación Global 2014, en W/m2”

Radiación en W/m2	Total mensual	Promedio Mensual	Total anual	Promedio anual
Radiación Global Enero	231013,53	310,502056	1751825,41	200,5605677
Radiación Global Febrero	206896,63	307,88189		
Radiación Global Marzo	212232,85	285,259207		
Radiación Global Abril	121298,66	168,470361		
Radiación Global Mayo	71066,19	95,5190726		
Radiación Global Junio	53333,23	74,0739306		
Radiación Global Julio	47726,54	64,1485753		
Radiación Global Agosto	76486,19	102,804019		
Radiación Global Septiembre	139606,58	193,898028		
Radiación Global Octubre	189502,52	254,707688		
Radiación Global Noviembre	184116,81	255,717792		
Radiación Global Diciembre	218545,68	293,744194		

Tabla A.0.6 “Registro Radiación Global 2014, en kWh/m²”

Radiación en kWh/m²	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Total mensual	5544,32472	4965,51912	5093,5884	2911,1678	1705,58856	1279,99752
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Total mensual	1145,43696	1835,66856	3350,55792	4548,0605	4418,80344	5245,09632
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Promedio Mensual	7,45204935	7,38916536	6,84622097	4,0432887	2,292457742	1,77777433
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Promedio Mensual	1,53956581	2,46729645	4,65355267	6,1129845	6,137227	7,04986065
Total anual	Promedio anual					
42043,80984	4,813453626					

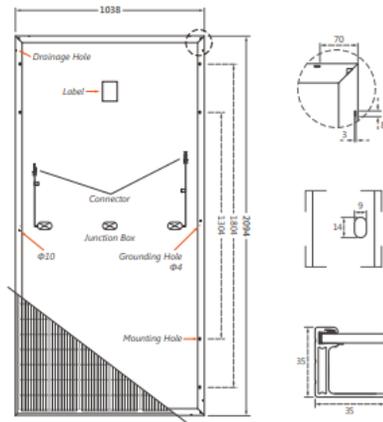


ANEXO B: Datasheet componentes

- Panel Solar FV

DHM-72L9 430~460W

DESIGN



MECHANICAL SPECIFICATION

Cells Type	Dimension (L×W×T)	Weight
Mono 166×83mm	2094×1038×35mm	23.5kg
Packing	31pcs/pallet, 682pcs/40HQ	
Cable (Including connector)	4.0mm ² , Portrait: 300mm(+)/400mm(-) Landscape: 1400mm(+)/1400mm(-)	
No. of Cells	144 (6×24)	
Glass	3.2mm High Transmission, Antireflection Coating	
Junction box	IP68, 3 Bypass Diodes	
Connector	MC4 Compatible	

OPERATING PARAMETERS

Maximum system voltage	1000V/1500V DC
Operating Temperature	-40 ~ +85°C
Maximum series fuse rating	20A
Snow load, frontside	5400Pa
Wind load, backside	2400Pa
Nominal operating cell temperature	45°C±2°C
Application level	Class A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS(STC)

MODULE TYPE	DHM-72L9						
Maximum Power (Pmax)	430W	435W	440W	445W	450W	455W	460W
Open-circuit Voltage (Voc)	48.70V	48.85V	49.00V	49.15V	49.30V	49.45V	49.60V
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.51V	41.66V	41.81V	41.96V	42.11V	42.26V	42.41V
Short-circuit Current (Isc)	11.23A	11.26A	11.29A	11.32A	11.35A	11.38A	11.41A
Maximum Power Current (Imp)	10.36A	10.44A	10.52A	10.61A	10.69A	10.77A	10.85A
Module Efficiency (%)	19.78%	20.01%	20.24%	20.47%	20.70%	20.93%	21.16%
Power Tolerance	0~+5W						
Temperature Coefficient of Isc	0.05%/°C						
Temperature Coefficient of Voc	-0.31%/°C						
Temperature Coefficient of Pmax	-0.35%/°C						

Standard Test Environment : Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, Spectrum AM1.5

ELECTRICAL CHARACTERISTICS(NOCT)

MODULE TYPE	DHM-72L9						
Maximum Power (Pmax)	323W	327W	331W	334W	338W	342W	346W
Open-circuit Voltage (Voc)	46.09V	46.23V	46.37V	46.51V	46.66V	46.80V	46.94V
Maximum Power Voltage (Vmp)	39.28V	39.43V	39.57V	39.71V	39.85V	39.99V	40.14V
Short-circuit Current (Isc)	9.06A	9.09A	9.11A	9.13A	9.16A	9.18A	9.21A
Maximum Power Current (Imp)	8.23A	8.29A	8.36A	8.42A	8.49A	8.55A	8.61A

Standard Test Environment : Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Spectrum AM1.5, Wind speed 1m/s

- Inversor de corriente

Item	NP2500-12	NP2500-22	NP2500-42	NP3000-22	NP3000-42	NP3500-42	NP4000-22	NP4000-42	NP5000-42
Continuous output power	2500W@25°C 500W@45°C	2500W@25°C 2500W@45°C	2500W@25°C 2500W@45°C	3000W@25°C 3000W@45°C	3000W@25°C 3000W@45°C	3500W@25°C 3500W@45°C	4000W@25°C 4000W@45°C	4000W@25°C 4000W@45°C	5000W@25°C 5000W@45°C
Surge power	5000W	5000W	5000W	6000W	6000W	7000W	8000W	8000W	10000W
Output voltage	220/230VAC (-8%→+3%)	220/230VAC (-6%→+3%)	220/230VAC (±3%)	220/230VAC (-5%→+3%)	220/230VAC (±3%)	220/230VAC (±3%)	220/230VAC (±3%)	220/230VAC (±3%)	220/230VAC (±3%)
Output frequency	50/60Hz±0.2%								
Output wave	Pure sine wave								
Output distortion THD	THD<5% (Resistive load)	THD<3% (Resistive load)	THD<3% (Resistive load)	THD<3% (Resistive load)	THD<3% (Resistive load)	THD<3% (Resistive load)	THD<3% (Resistive load)	THD<3% (Resistive load)	THD<3% (Resistive load)
Load power factor	0.2-1(Load VA ≤ Continuous output power)								
Rated input voltage	12VDC	24VDC	48VDC	24VDC	48VDC	48VDC	24VDC	48VDC	48VDC
Input voltage range	10.8~16VDC	21.6~32VDC	43.2~64VDC	21.6~32VDC	43.2~64VDC	43.2~64VDC	21.6~32VDC	43.2~64VDC	43.2~64VDC
Output efficiency of 80% rated power	87%	89%	91.50%	88%	90%	90%	89%	91.50%	91.50%
Max. rated efficiency	85%	87%	90%	86%	89%	89%	86%	90%	90%
Max. output efficiency	90%(700W)	93%(500W)	94%(800W)	94%(500W)	94%(900W)	93%(900W)	93%(1400W)	94%(1000W)	94%(1400W)
No-load current	< 3.0A	< 0.8A	< 0.5A	< 0.8A	< 0.5A	< 0.5A	< 2.5A	< 0.5A	< 0.5A
Static Loss	< 0.6W@12V	< 0.6W@24V	< 1.8W@48V	< 0.6W@24V	< 1.8W@48V	< 1.8W@48V	< 0.6W@24V	< 1.8W@48V	< 1.8W@48V
RS485 com. port	5VDC/300mA (Non-isolated)	5VDC/300mA (Non-isolated)	5VDC/300mA (Non-isolated)	5VDC/300mA (Non-isolated)	5VDC/200mA (Isolation)	5VDC/200mA (Isolation)	5VDC/300mA (Non-isolated)	5VDC/200mA (Isolation)	5VDC/200mA (Isolation)
Dimension(LxWxH)	584×393×175 mm	604×393×175 mm	549×328×175 mm	639×393×175.5 mm	584×328×170 mm	564×353×175 mm	660×435×210 mm	604×393×175 mm	640×435×210 mm
Mounting dimension	350×372mm	350×372mm	350×307mm	350×372mm	350×307mm	350×332mm	625×300mm	350×340mm	605×300mm
Net Weight	32kg	32.2kg	25.5kg	34.0kg	28.4kg	32.2kg	43.2kg	37kg	50kg
Operating temperature range	-20°C→+45°C(Full load)								
Relative humidity	< 95%(N.C.)								
Enclosure	IP20								

- Pila de Combustible

Type of fuel cell	PEM
Number of cells	120
Rated Power	5000W
Performance	72V @ 70A
H2 Supply valve voltage	12V
Purging valve voltage	12V
Blower voltage	24V
Reactants	Hydrogen and Air
External temperature	5 to 30°C
Max stack temperature	65°C
H2 Pressure	0.45-0.55bar
Hydrogen purity	≧ 99.995 % dry H2
Humidification	self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Weight (with fan & casing)	30kg (±200g)
Controller	2.5kg (±100g)
Dimension	65cm x 35cm x 21.2cm
Flow rate at max output*	65 L/min
Start up time	≦ 30S at ambient temperature
Efficiency of stack	40% @ 72V
Low voltage shut down	60V
Over current shut down	90A
Over temperature shut down	65°C
External power supply**	24V(±1V), 8A~12A