



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**“EVALUACIÓN Y MODELACIÓN PARA LA UTILIZACIÓN  
DEL HIDRÓGENO VERDE MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA  
PARA UNA MICRORED EN LA ISLA MOCHA”**

Autores

Sebastián Nicolás Aranda Cea

Andrés Misael Vera Cruz

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

Fecha: 12/Septiembre/2022



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**“EVALUACIÓN Y MODELACIÓN PARA LA UTILIZACIÓN  
DEL HIDRÓGENO VERDE MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA  
PARA UNA MICRORED EN LA ISLA MOCHA”**

Autores

Sebastián Nicolás Aranda Cea

Andrés Misael Vera Cruz

Docente Patrocinaste: Vladimir Esparza Henríquez

Docente Adjunto o corrector: DSc. Jaime Rohten Carrasco.

# Índice

<b>1 ANTECEDENTES GENERALES .....</b>	<b>12</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.2.1 <i>Objetivo General</i> .....	13
1.2.2 <i>Objetivo Especifico</i> .....	13
1.2.3 <i>Planteamiento del problema</i> .....	13
<b>2 HIDRÓGENO .....</b>	<b>14</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	14
2.2 PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO VERDE .....	14
2.2.1 <i>Procesos convencionales de producción de hidrógeno</i> .....	15
2.3 ELECTROLÍISIS.....	17
2.3.1 <i>Métodos de electrólisis</i> .....	18
2.3.2 <i>Eficiencia en procesos de producción de hidrógeno</i> .....	19
2.4 ALMACENAMIENTO LÍQUIDO .....	20
2.5 ALMACENAMIENTO GASEOSO .....	20
2.6 EL HIDRÓGENO VERDE EN CHILE .....	20
2.7 TRANSPORTE DE HIDRÓGENO .....	22
2.7.1 <i>Transporte de Hidrógeno Gaseoso</i> .....	22
2.7.2 <i>Transporte de Hidrógeno Líquido</i> .....	23
2.8 CONCLUSIÓN.....	23
<b>3 PILAS DE COMBUSTIBLE.....</b>	<b>24</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	24
3.2 DESARROLLO.....	24
3.2.1 <i>Funcionamiento de las pilas de combustible</i> .....	24
3.2.2 <i>Tipos de pila de combustible</i> .....	26
3.2.3 <i>Aplicaciones de pilas de combustible</i> .....	27
3.3 CONCLUSIÓN.....	28
<b>4 ISLA MOCHA.....</b>	<b>29</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	29
4.2 DESARROLLO.....	29
4.2.1 <i>Condiciones climáticas</i> .....	30
4.2.2 <i>Abastecimiento y distribución de energía eléctrica</i> .....	30
4.3 CONCLUSIÓN.....	31
<b>5 AEROGENERADORES .....</b>	<b>32</b>
5.1 INTRODUCCIÓN.....	32
5.2 DESARROLLO.....	32
5.2.1 <i>Componentes de Aerogeneradores</i> .....	33
5.2.2 <i>Funcionamiento del aerogenerador</i> .....	34
5.2.3 <i>Modelos de aerogeneradores</i> .....	35
5.2.4 <i>Tipos de aerogeneradores según su velocidad de rotación</i> .....	40

5.2.5	<i>Configuración de turbinas eólicas</i> .....	41
5.2.6	<i>Emplazamiento de aerogeneradores</i> .....	44
5.2.7	<i>Eficiencia de los Aerogeneradores</i> .....	46
5.2.8	<i>Campos de aerogeneradores(eólicos) en Chile</i> .....	47
5.2.9	<i>Avances en Aerogeneradores</i> .....	48
5.3	CONCLUSIÓN.....	49
<b>6</b>	<b>ENERGIA EÓLICA</b> .....	<b>50</b>
6.1	INTRODUCCIÓN.....	50
6.2	DESARROLLO.....	50
6.2.1	<i>Velocidad del viento y proyectos en Chile</i> .....	53
6.3	CONCLUSIÓN.....	57
<b>7</b>	<b>EVALUACIÓN</b> .....	<b>58</b>
7.1	INTRODUCCIÓN.....	58
7.2	DESARROLLO.....	58
7.2.1	<i>Evaluación de aerogenerador</i> .....	58
7.2.1.1	<i>Posible ubicación de los aerogeneradores</i> .....	65
7.2.2	<i>Evaluación de planta productora de hidrógeno</i> .....	66
7.2.3	<i>Evaluación planta de almacenamiento</i> .....	68
7.2.4	<i>Evaluación pila de combustible a utilizar</i> .....	70
7.2.5	<i>Cálculos de cantidades necesarias a utilizar en el proyecto</i> .....	71
7.3	CONCLUSIÓN.....	87
<b>8</b>	<b>COSTOS</b> .....	<b>88</b>
8.1	INTRODUCCIÓN.....	88
8.2	DESARROLLO.....	88
8.2.1	<i>Aerogeneradores</i> .....	88
8.2.2	<i>Electrolizador</i> .....	89
8.2.3	<i>Planta de almacenamiento</i> .....	90
8.2.4	<i>Pila de combustible</i> .....	92
8.2.5	<i>Alimentación de agua para electrolizadores</i> .....	92
8.2.6	<i>Otros gastos de inversión</i> .....	92
8.3	CONCLUSIÓN.....	93
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	<b>94</b>
<b>10</b>	<b>TRABAJOS FUTUROS</b> .....	<b>96</b>
10.1	INTRODUCCIÓN.....	96
10.2	DESARROLLO.....	96
10.2.1	<i>Reutilización de los residuos</i> .....	96
10.2.2	<i>Utilización del agua de mar</i> .....	96
10.2.3	<i>Ampliación del parque eólico</i> .....	96
10.2.4	<i>Producir para vender</i> .....	96
10.3	CONCLUSIÓN.....	97
<b>11</b>	<b>ANEXO</b> .....	<b>97</b>

11.1.1	Aerogeneradores.....	97
11.1.2	Electrolizadores.....	97
11.1.3	Pilas de combustible.....	98
11.1.4	Estanques.....	98
11.1.5	Compresor.....	98
11.1.6	Bomba extractora.....	98
11.1.7	Tuberías.....	99
<b>12</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>100</b>



## Índice de imágenes

Figura 1 Materias primas para la producción de hidrógeno.....	15
Figura 2 Consumo de hidrógeno producido.....	15
Figura 3 Electrolito.....	18
Figura 4 Proceso de producción de hidrógeno verde.....	19
Figura 5 Costo nivelado de hidrógeno verde (USD/kg H <sub>2</sub> ).....	21
Figura 6 Proyección de mercado de hidrógeno verde.....	21
Figura 7 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible.....	25
Figura 8 Avioneta eléctrica con pilas de combustible de hidrógeno.....	27
Figura 9 Costa oeste de Isla Mocha.....	29
Figura 10 Información del viento de Isla Mocha.....	30
Figura 11 Partes del aerogenerador.....	33
Figura 12 Turbina eólica de eje vertical de Savonius.....	35
Figura 13 Turbina eólica de eje vertical de Darrieus.....	36
Figura 14 Turbina eólica de eje vertical de Darrieus tipo H.....	36
Figura 15 Turbina eólica de Gorlov.....	37
Figura 16 Aeroturbina lenta.....	38
Figura 17 Aeroturbina rápida.....	38
Figura 18 Clases de aerogeneradores.....	39
Figura 19 Velocidad respecto a potencia eléctrica producida.....	40
Figura 20 Configuración de turbinas tipo 1.....	42
Figura 21 Configuración de turbinas tipo 2.....	42
Figura 22 Configuración de turbinas tipo 3.....	43
Figura 23 Configuración de turbinas tipo 4.....	44
Figura 24 Configuración de turbinas tipo 5.....	44
Figura 25 Walney Extension, Reino Unido.....	48
Figura 26 Aerogenerador Vortex Tacoma.....	49
Figura 27 Ejemplo de campo eólico onshore.....	51
Figura 28 Campo eólico offshore.....	51
Figura 29 Mapa Explorador Eólico.....	53
Figura 30 Ciclo anual de velocidad del viento para zona sur (Región de Magallanes).....	54
Figura 31 Ciclo anual de velocidad del viento para zona centro-sur (Región del Bio Bio).....	54
Figura 32 Escala de vientos.....	55
Figura 33 Capacidad total instalada y capacidad eólica instalada.....	56
Figura 34 Especificaciones del aerogenerador.....	59
Figura 35 Velocidades del viento año 2015.....	64
Figura 36 Velocidades del viento año 2016.....	64
Figura 37 Velocidades del viento año 2017.....	64
Figura 38 Ubicación ideal para el parque eólico.....	65
Figura 39 Electrolizador reducido.....	67
Figura 40 Compresor Hiperbaric.....	68
Figura 41 Compresor de oxigeno.....	69
Figura 42 Estanque para gases.....	70

Figura 43 Pila de combustible.....	70
Figura 44 Especificaciones técnicas de la pila.....	71
Figura 45 Comparación de parques eólicos en Chile vs parque eólico Isla Mocha.....	82
Figura 46 Comparación de parques eólicos en la región.....	83
Figura 47 Proyección de consumo energético.....	83
Figura 48 Consumo energético con producción de H <sub>2</sub> V.....	84
Figura 49 Consumo energético vs producción energética.....	84
Figura 50 Agua invertida vs agua recuperada.....	85
Figura 51 Comparativa de utilización de agua.....	86
Figura 52 Diagrama de modelo de la planta.....	94



## Índice de tablas

Tabla 1: Eficiencia de materias primas. ....	19
Tabla 2: Detalles de tipos de pilas de combustible .....	26
Tabla 3: Sistema de distribución de la Isla Mocha.....	31
Tabla 4: Comparación de tipos de aerogeneradores.....	39
Tabla 5: Comparación de FSWT y VSWT. ....	41
Tabla 6: Calidad de emplazamiento de aerogeneradores en base a la velocidad del viento. ....	46
Tabla 7: Ventajas/ desventajas de la energía eólica. ....	52
Tabla 8: Energía producida por los 10 parques eólicos más grandes de Chile. ....	56
Tabla 9: Potencia producida en el aerogenerador por velocidad del viento.....	59
Tabla 10 Generación de energía para el 2015 .....	60
Tabla 11 Generación de energía para el 2016. ....	61
Tabla 12 Generación de energía para el 2017 .....	62
Tabla 13: Producción aproximada en años 2015, 2016 y 2017.....	62
Tabla 14: Cantidad de horas sin funcionamiento. ....	63
Tabla 15: Cantidad de horas sin funcionamiento continuas.....	63
Tabla 16: Datos técnicos electrolizador .....	67
Tabla 17: Especificaciones compresor Hiperbaric .....	68
Tabla 18: Especificaciones compresor de oxígeno .....	69
Tabla 19: Valores pila de combustible seleccionada.....	71
Tabla 20: Variables estándar .....	73
Tabla 21: Datos promedio de variables a utilizar en los factores de corrección .....	74
Tabla 22: Factores de corrección .....	75
Tabla 23: Factores de corrección total .....	75
Tabla 24: Flujos mínimos y máximos que se pueden obtener por año .....	76
Tabla 25: Flujos estándar por fabricante .....	79
Tabla 26: Flujos mínimos y máximos de aire necesario .....	80
Tabla 27: Totalidad de recursos a utilizar y producidos. ....	81
Tabla 28: Cantidad de agua utilizada en la región por comuna .....	86
Tabla 29: Aproximación total de costos.....	93



## Abreviaciones

BUSD: Proyección de mercados Chilenos de Hidrógeno verde y derivados.

H2V: Hidrógeno Verde.

Nm<sup>3</sup>: Normal metro cúbico.

HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine.

VAWT: Vertical Axis Wind Turbine.

FSWT: Fixed-Speed Wind Turbine.

VSWT: Variable-Speed Wind Turbine.

DFIG: Doubly Fed Induction Generator.

SEN: Sistema Eléctrico Nacional.

SEM: Sistema Eléctrico de Magallanes.

SEA: Sistema Eléctrico de Aysén

Onshore: Ubicación sobre Tierra firme.

Offshore: Ubicación sobre mar Abierto.

$F_{Cap}$  : Factor de capacidad o de planta.

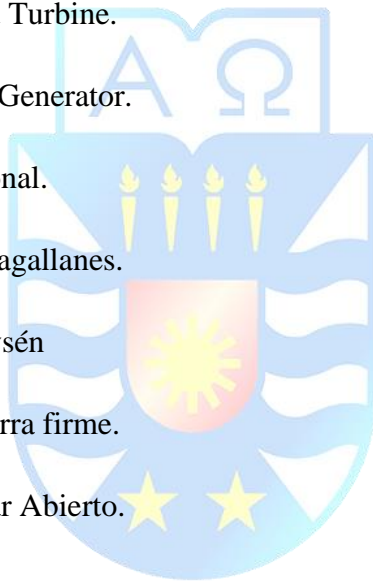
$E_{Rg}$  : Energía real generada.

$E_{ig}$  : Energía Ideal a generar.

PEMFC: Pilas de combustible de membrana de intercambio protónico.

AFC: Pilas de combustible alcalinas.

PAFC: Pilas de combustible de ácido fosfórico.



MCFC: Pilas de combustible de carbonato fundido.

SOFC: Pilas de combustible de óxido sólido.

DMFC: Pilas de combustible de metanol.

SSO: Sudsudoeste.

MWM: Motoren-Werke Mannheim

GHS: Green Hydrogen Systems

SPP: San Pedro de la Paz.

N: Normal (Estandarización).

L: Litros.



## Resumen

En el presente trabajo se realiza la “Evaluación y modelación para la utilización del hidrógeno verde mediante energía eólica para una microred en Isla Mocha”. Además, en este trabajo a partir de datos históricos se procede a elaborar, una evaluación las condiciones climáticas de la isla, análisis de viento y el potencial de [kW] para la implementación de aerogeneradores. Posteriormente se presenta un estudio sobre el consumo y producción en [kW] que posee la microred en estudio. Finalmente, con los estudios y evaluaciones nombradas anteriormente, se procede a evaluar la implementación de una planta de H<sub>2</sub>V.



# **1 ANTECEDENTES GENERALES**

## **1.1 Introducción**

Actualmente el mundo está tomando conciencia sobre lo poco sustentable que son las energías convencionales para el planeta, lo que trajo como consecuencia una preocupación mundial, por lo que se comenzaron a hacer planes y a implementar políticas públicas para que se impulse otro tipo de energía, energías renovables y no contaminantes. Primero, las dos que más fuerza tomaron fueron la energía solar y la eólica, pero en el último tiempo también empezó a tomar fuerza el hidrógeno verde, que es una forma de energía limpia y sustentable, y la mejor característica de esta es que se puede producir a base de otras energías limpias, lo que, si se utiliza de buena manera, podría reducir el uso de energías convencionales (contaminantes o poco amigables con el medio ambiente).

Uno de los grandes problemas que hay en la actualidad con respecto a la energía, son las redes de energía eléctrica que están aisladas, en este caso la Isla Mocha, no posee conexión directa al Sistema Interconectado Central de Chile por lo que, para surtir a la isla de energía, se utilizan las energías convencionales más contaminantes.

Sabiendo esto y teniendo en cuenta que, al ser una isla, esta posee velocidades de viento prácticamente ideales para la instalación de un campo eólico, lo que podría facilitar la producción energética a través de los aerogeneradores instalados, cosa que se podría complementar con hidrógeno en los momentos que dichos aerogeneradores no puedan operar.

Esto traería como consecuencia una producción autónoma de energía en la isla y para la isla y sin detallar que sería una producción totalmente amigable con el medio ambiente.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Modelamiento técnico y económico del suministro eléctrico para la Isla Mocha mediante un parque eólico con regulación basada en hidrógeno verde.

### 1.2.2 Objetivo Especifico

- Estudio de las condiciones climáticas y del viento de la Isla Mocha.
- Determinar, dimensionar y caracterizar el consumo energético de la Isla Mocha para ser suministrado por generación eólica.
- Estudio e implementación de una planta de hidrógeno verde para regulación en la intermitencia de la generación eólica mediante el uso de hidrógeno verde.

### 1.2.3 Planteamiento del problema

La Isla Mocha es una isla ubicada frente a las costas de la provincia de Arauco en la región del Biobío a 34,3[km] de Tirúa, esto imposibilita que esté conectada al Sistema Interconectado Central (SIC). Por este motivo, la forma de generar su propia energía es mediante generadores de gas natural y de diésel. Debido a que ambos son combustibles fósiles, su uso es limitado, contaminante y su costo cada vez se eleva más, por lo que es recomendable una implementación de producción energética más sustentable, limpia y renovable, como es el hidrógeno verde.

La aparición del concepto de hidrógeno verde (H<sub>2</sub>V) como respuesta para asegurar minimizar la emisión de huella de carbono, así entonces es preciso considerar toda la cadena de valor del hidrógeno, desde su producción a partir de fuentes renovables mediante la electrólisis del agua, hasta su almacenamiento, distribución y transformación final en electricidad a través del uso de pilas de combustible para multitud de aplicaciones.

Para poder hacer efectiva la electrólisis, la fuente de energía renovable a utilizar sería la energía eólica, esto debido a que la topografía y ubicación de la isla es óptima para la implementación de aerogeneradores, ya que la velocidad promedio del viento en la isla (6,17 [m/s]) siendo ideal para el trabajo de estos generadores (velocidad mínima requerida 3-4[m/s] y para su máxima producción es de 13-14[m/s]).

## 2 HIDRÓGENO

### 2.1 Introducción

El hidrógeno es el elemento más liviano y abundante del universo, pero no puede ser encontrado en el planeta en estado puro, sino que, unido a otros compuestos, como, por ejemplo, el agua [1].

Primero, se debe entender que, para el hidrógeno, se define una cantidad bastante grande de colores, como por ejemplo gris (carbón petróleo o gas), café (carbón petróleo o gas), azul (producido con bajas emisiones de carbono), verde (energías renovables modernas), amarillo (energía solar), etc. Cada uno de estos está asociado al método de obtención de este, aquí se especifica cuál es su materia prima y si existen emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) asociadas a su producción.

Uno de los grandes objetivos mundiales desde ya hace unos años es el de producir hidrógeno verde, ya que este es el que se obtiene de un proceso en que no se emiten gases de efecto invernadero, esto debido a que, primero se obtiene electricidad en base a las energías renovables no convencionales, como la eólica y la solar. Luego se somete la materia prima principal, que en este caso es el agua, a un proceso de electrólisis. Para finalmente pasar a ser almacenado en recipientes especiales.

### 2.2 Producción y almacenamiento de hidrógeno verde

Para la producción del hidrógeno verde, lo primero es obtener electricidad en base a energías renovables y tradicionales, como son la eólica y solar. Luego, el agua se somete al proceso de electrólisis, que es el proceso en el que se separan los elementos de un compuesto por medio de la electricidad. La producción se puede separar como producción a través de procesos convencionales (utilización de recursos fósiles) o de procesos biológicos (utilización de recursos renovables) [2].

### 2.2.1 Procesos convencionales de producción de hidrógeno

La producción mundial de  $H_2$  se sitúa en torno a los  $450 \times 10^9 [Nm^3]$  ( $450 [bcm]$ ), lo que supone unos 40 millones de toneladas anuales, según datos de la Agencia Internacional de Energía.

De todo este hidrógeno producido, el 96% es en base a combustibles fósiles, principalmente por reformado de gas natural con vapor de agua y se consume como un componente que forma parte de muchos procesos convencionales. Aproximadamente un 72% se utiliza en la industria química y petroquímica, el 24% restante se utiliza en metalurgia, en electrónica y en la propulsión de vehículos espaciales. Y solo el 4% se produce por electrólisis del agua, que es el hidrógeno que se destina a las aplicaciones que requieren una gran pureza de este. Ya conociendo esto, se puede decir además que  $5,1 [kg]$  de  $C$  son emitidos a la atmosfera por cada  $kg$  de hidrógeno producido [3].

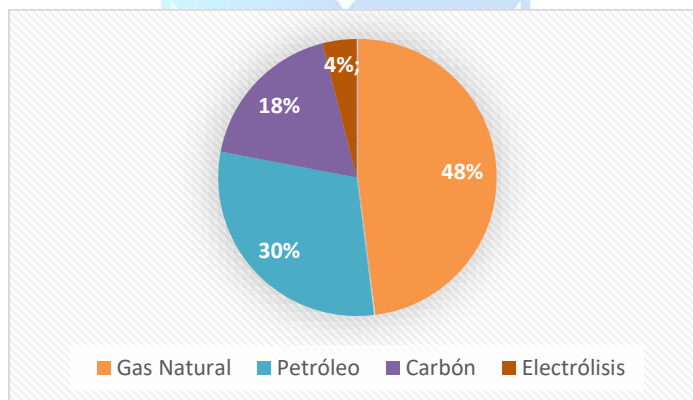


Figura 1 Materias primas para la producción de hidrógeno.

Fuente: [3].

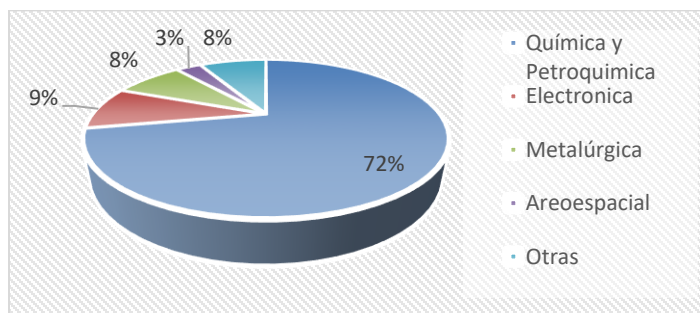


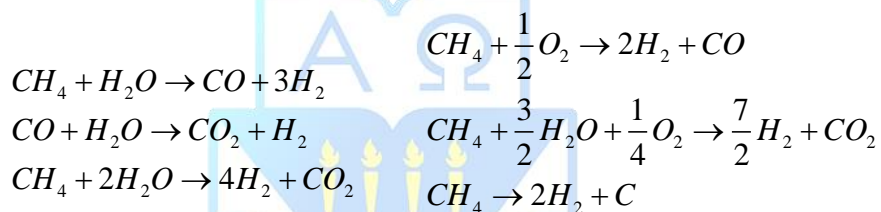
Figura 2 Consumo de hidrógeno producido.

Fuente: [3].

Ahora, teniendo en cuenta lo anterior, las técnicas para producción de hidrógeno convencionales se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Procesos de conversión química: Aquí se incluyen el reformado, la gasificación y la pirolisis.

- Reformado de hidrocarburos: Este proceso es el más utilizado en la actualidad para producir hidrógeno. Se necesita gas natural que contenga un alto porcentaje de metano. Consiste en hacer reaccionar al gas natural con vapor de agua sobre un catalizador de níquel colocado en un reformador a temperaturas de 1.200[°K] y presiones de 20 a 30 [bar]. Cabe destacar que en este proceso se requiere una etapa de eliminación de contaminantes (azufre), lo que evita el deterioro de la actividad catalítica [2].



- Gasificación: Este proceso es en base al carbón, se requiere que este en estado sólido y se procesa para que se transforme en un combustible gaseoso(symgas). La gasificación se lleva a cabo a través de una oxidación parcial, esta genera una mezcla a la que hay que retirarle sustancias y compuestos que no son útiles para el proceso.
2. Procesos termolíticos: En estos procesos se incluye la termólisis directa y por ciclos termoquímicos [3].

- Termólisis: Se descompone agua a través de procesos que son puramente térmicos.

3. Procesos electrolíticos: En estos procesos solo se encuentra la electrólisis, que cabe mencionar que puede utilizar tanto energías renovables como energías convencionales [3].

- Electrolisis: Al ser un proceso primordial para este documento se llevar a cabo un apartado específico para este tema en particular.



Luego se enuncian las técnicas de producción de hidrógeno no convencionales:

1. Procesos Biológicos: Estos procesos cuentan con la fermentación y la digestión anaerobia.
  - Fermentación/Digestión anaerobia: Estos procesos se basan en enzimas presentes en ciertos microorganismos especializados. Una de sus principales características es que tienen la posibilidad de realizar el proceso llamado Bio-fotólisis, este consiste en la utilización de la luz para separar moléculas de agua [3].
2. Procesos Fotónicos: En este grupo entran la fotoelectrólisis, la fotobiólisis y la fotocatalisis [3].
  - Fotocatalisis/Fotoelectrólisis: Ambos procesos consisten en la disociación del agua por radiación solar usando fotocatalizadores químicos.

### 2.3 Electrólisis

La electrólisis es un proceso donde la energía eléctrica cambia a energía química. Esta consiste en descomponer electrólitos por medio de la corriente eléctrica. Dicha electrólisis se lleva cabo mediante una fuente de energía eléctrica conectada a dos electrodos hechos con platino o acero inoxidable, los que toman de función de representar el polo positivo, normalmente llamado ánodo (+) y el polo negativo, que comúnmente es llamado cátodo (-) [3].

Para llevar a cabo la electrólisis, los electrodos se deben poner en agua de tal forma que el lado positivo se encarga de extraer el oxígeno, mientras que el lado negativo extrae el hidrógeno, de esta manera se produce la descomposición de la molécula.

Esto se explica de manera que los iones positivos migran al cátodo, mientras que los iones negativos migran al ánodo. Los iones positivos son llamados cationes y son todos los metales. Debido a su valencia, perdieron electrones y pueden tomar electrones. Los aniones son iones negativos. Llevan normalmente los electrones por lo cual tienen la oportunidad de cederlos. Ahora sí, los cationes entran en contacto con el cátodo, captan de nuevo los electrones que perdieron y pasan al estado elemental. Los aniones reaccionan de manera

opuesta, si entran en contacto con el ánodo, ceden sus electrones y pasan al estado elemental. En el electrodo, los cationes serán reducidos y los aniones serán oxidados.

Para controlar la reacción se puede elegir entre diversos materiales para el electrodo, así como se puede utilizar varios electrólitos para las reacciones y los efectos especiales. Cabe destacar que el electrolito contiene los iones que conducen la corriente.

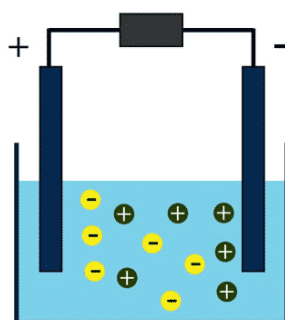


Figura 3 Electrolito.

Fuente: Google Imágenes.

### 2.3.1 Métodos de electrólisis

Existen varios métodos de llevar a cabo la electrólisis, pero comercialmente se utilizan comúnmente dos, mas el primero que el segundo [3].

- **Alcalino:** Utiliza 2 electrodos en una solución alcalina (típicamente hidróxido de potasio), separados por una membrana que deja pasar iones hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) cuando se le aplica corriente, y evita la mezcla del oxígeno con el hidrógeno resultante. Funciona mejor para plantas de grandes generaciones y de corriente estable. Es la tecnología más madura, extendida y la de menor costo.
- **PEM:** Considerados como la opción más prometedora a futuro, utiliza una membrana sólida de intercambio de protones ( $\text{H}^+$ ). Funciona bien para plantas de energía más pequeñas y con alta variabilidad. Posee altas densidades de corriente, produce un hidrógeno más puro y evita utilizar electrólitos líquidos [3].

El método PEM va mas en vista hacia el futuro, se utiliza pero un en bajo porcentaje de lugares, mientras que el alcalino es el mas común en estos momentos.

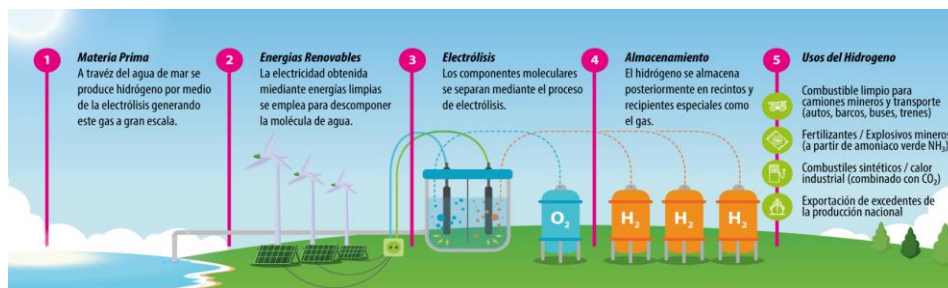


Figura 4 Proceso de producción de hidrógeno verde.

Fuente: Ministerio de Energía, Chile.

### 2.3.2 Eficiencia en procesos de producción de hidrógeno

Actualmente, es posible hallar diversos estudios que generan una idea de algunos parámetros como el índice de costos por año, el costo capital, el costo de la materia prima, y la cantidad de hidrógeno producida por día, entre otros [4].

Como ya se mencionó anteriormente en la descripción de los métodos convencionales y los procesos biológicos, existe una gran diferencia entre los procesos que han sido utilizados comúnmente en la industria productora de hidrógeno, principalmente que utiliza hidrocarburos.

Para efectos de comparación, en términos energéticos 1 kilogramo de hidrógeno posee 119,9 [MJ], que son casi equivalentes a un galón (3,8 litros) de gasolina (121,7 [MJ]).

Tabla 1: Eficiencia de materias primas.

Tecnología	Materia Prima	Efectividad (%)
Reformación de vapor	Hidrocarburos	70-85%
Oxidación Parcial	Hidrocarburos	60-75%
Reformación autotérmica	Hidrocarburos	60-75%
Pirolisis	Carbón	50%
Fotólisis	Energía Solar + Agua	0,50%
Fermentación a Oscuras	Biomasa	60-80%
Celda electrolítica microbiana	Biomasa + energía eléctrica	78%
Electrolizador Alcalino	Agua + Energía eléctrica	50-70%
PEM electrolizador	Agua + Energía eléctrica	55-70%

Fuente: [5].

A la hora de almacenar el hidrógeno, se utilizan comúnmente dos maneras, el almacenamiento: líquido y gaseoso.

## 2.4 Almacenamiento líquido

Se necesita llevar el hidrógeno a una temperatura bajo los  $-252^{\circ}\text{C}$  ( $-525^{\circ}\text{K}$ ) para poder licuarlo, se debe aislar y refrigerar para mantenerlo así, con lo que el costo aumenta aproximadamente 1 USD por kg de hidrógeno. También se utiliza más energía que en el proceso de presurización, logrando una eficiencia del orden del 70%. Sin embargo, almacenarlo de esta forma tiene grandes ventajas en cuanto a la energía almacenada, pudiendo guardar aproximadamente el doble que el del gas comprimido en el mismo volumen.

## 2.5 Almacenamiento gaseoso

Es la opción más económica y sencilla de almacenamiento, añadiendo un costo de aproximadamente 0,3 USD por kg de hidrógeno almacenado, y además se utiliza menos energía para comprimirlo, pudiéndose llevar a 700[bar] de presión con una eficiencia entre el 80 y 91%. Por el contrario, se puede almacenar una menor cantidad de hidrógeno, y a mayor presión, mayor grosor debe tener los tanques que lo guardan, agregándole más peso al sistema que lo transporte.

## 2.6 El hidrógeno verde en Chile

Chile es un país rico en energías renovables, ya que los sectores tanto solares como eólicos están madurando aceleradamente. Según LA ESTRATEGIA NACIONAL DE HIDRÓGENO VERDE, en 6 años Chile ha quintuplicado su capacidad de generación tanto solar como eólica y proyecta que en el 2030 aproximadamente el 70% de su matriz eléctrica será renovable [6].

Todo lo anteriormente mencionado, sumado a las bajas en costos tanto de electrolizadores y de generación renovable, haría muy productivo el hidrógeno verde, a tal punto de ser una competencia tanto doméstica como internacional en la producción de este [6].



Figura 5 Costo nivelado de hidrógeno verde (USD/kg H2).

Fuente: Ministerio de Energía, Chile.

Ahora sí, se habla del hidrógeno producido en el desierto de Atacama y en la región de Magallanes, se podría decir que llegaría a tener el costo nivelado de producción más bajo en todo el mundo para el año 2030 [6].

Son tantas las posibilidades que tiene Chile para el hidrógeno verde que, según proyecciones del Mercado Chileno de Hidrógeno Verde (BUSD), la energía renovable que este trae abriría las puertas al sector económico que podría equiparar el tamaño de la industria minera chilena que, como es bien conocido, es la fuente de ingresos principal del país, como también un gran consumidor de energía [6].

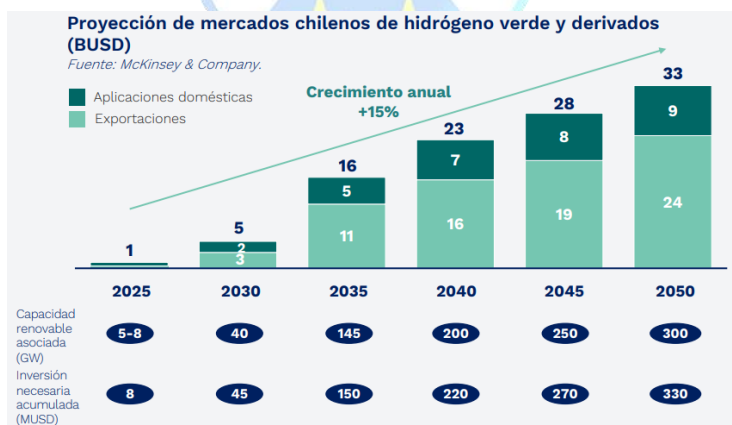


Figura 6 Proyección de mercado de hidrógeno verde.

Fuente: Ministerio de Energía, Chile.

Y, si se quiere hablar de plantas de hidrógeno verde en Chile, se puede comentar que el 10 de septiembre del 2021, comenzó la construcción de la primera planta piloto de escala industrial para producción de hidrógeno verde en el país, se ubica en Cabo Negro, Punta Arenas.

Esta planta producirá hidrógeno verde mediante el proceso de electrólisis, alimentado directamente con energía renovable que es producida por unas turbinas eólicas instaladas en la zona.

El proyecto liderado por la empresa ENEL, se nutre de las turbinas de 3,4[MW] y utiliza electrolizadores de 1,25[MW] produciendo hidrógeno verde a base de agua. Luego, este será utilizado para producir combustibles carbono-neutrales.

Otra planta instalada en Chile es la que está ubicada en Cerro Pabellón. Esta es una planta geotérmica y allí se produce hidrógeno verde desde el año 2017, pero a menor escala, ya que solo se alimenta la planta de tratamiento de agua y parte del consumo del campamento base de Cerro Pabellón.

## **2.7 Transporte de Hidrógeno**

Para clasificar los transportes del hidrógeno, se debe requerir a la forma de almacenamiento que este tenga. En este caso, primero se detalla el transporte del hidrógeno almacenado en forma de gaseosa.

### **2.7.1 Transporte de Hidrógeno Gaseoso.**

El hidrógeno gas suele ir comprimido en depósitos entre 200-700[bar]. Los depósitos convencionales de gas comprimido van de 200 a 350[bar] y son de acero austenítico. Pero cuando se requieren presiones superiores, dígase entre 400-700[bar], se utilizan materiales compuestos de fibra de carbono y polímeros, o bien aluminio reforzado con fibra de carbono.

Ahora, conociendo todo lo anterior, se puede decir que es posible transportarlo a través de camiones, ferrocarriles o barcos. Lo que si es necesario observar es que, por ejemplo, en caso de camiones, se debe revisar la distancia a recorrer, ya que tienen un costo alto y una cantidad de gas no muy grande (hablando de volumen) que pueden transportar.

Sabiendo todo esto, también se estudió el proceso de transporte del hidrógeno a través de gasoductos, ya que casi todas las compañías de gases industriales operan con mínimo una red de transporte a través de estos. Los costes de inversión son en función al diámetro de las tuberías, en caso del hidrógeno y comparándolo con el gas natural (una buena cantidad de tuberías alrededor del mundo), se necesitarían tuberías de mayor diámetro o una presión mayor a la utilizada en los gasoductos de gas natural. Por lo que se puede decir que, a igualdad de capacidad energética de la línea de transporte, el costo total de una línea para hidrógeno es aproximadamente seis veces el del gas natural.

### **2.7.2 Transporte de Hidrógeno Líquido**

Para dejar al hidrógeno en forma líquida, como ya se mencionó anteriormente, se utiliza el proceso de licuación, y en este se consume una cantidad de energía primaria bastante grande, se sitúa normalmente entre el 30-40% del contenido energético del hidrógeno líquido.

Ahora si se habla de costes, para no entrar tanto en detalles, se puede decir que mientras mayor volumen de hidrógeno haya, más rentable es hacer el proceso de licuación y trabajar el transporte en forma líquida.

Lo que es necesario mencionar es que el transporte lento, dígame esto por camión o por barco, y largas distancias, se necesita considerar las pérdidas por evaporación, estas pueden alcanzar entre 0,2 y 0,4% del hidrógeno líquido por día.

## **2.8 Conclusión**

Se ha contextualizado qué es el hidrógeno, las formas en cómo se produce, se especificaron las materias primas a utilizar y las energías a las cuales se puede recurrir para lograr la producción de este.

También se ha contextualizado el panorama nacional sobre el hidrógeno verde, destacando las fuertes ventajas que posee el país para la utilización de este tipo de energía, posicionándolo como una futura potencia mundial en la producción de este.

### 3 PILAS DE COMBUSTIBLE

#### 3.1 Introducción

Ante la necesidad del mundo de producir energía limpia, se desarrollaron diferentes métodos para lograrlo, uno de estos métodos son las pilas de combustible, que cumple varias funciones entre ellas almacenaje y producción de energía.

Las pilas tienen varias aplicaciones que se ven en la actualidad y otras que no tanto, pero que se espera que un par de años se vea con mucha fuerza alrededor del mundo.

#### 3.2 Desarrollo

La pila de combustible es una especie de batería de alta tecnología que convierte la energía química del combustible que la alimenta en energía eléctrica. Pero la diferencia principal con las pilas comunes y corrientes es que estas almacenan en su interior energía química que convierte en electricidad, pero cuando se termina esa energía química, suelen eliminarse, cosa que en las pilas de combustible no pasa, ya que estas convierten la energía química de un combustible que se reciben de una fuente externa y al no cortar esta fuente de alimentación, pueden entregar energía eléctrica de forma continua [1].

El combustible que se utiliza generalmente es el hidrógeno combinado en muchos casos con oxígeno (que cumple la función de comburente), para así obtener luego de todo el proceso agua, corriente continua (electricidad) y calor.

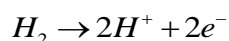
##### 3.2.1 Funcionamiento de las pilas de combustible

Una pila de combustible es en realidad la suma de pilas individuales que reciben el nombre de células o celdas de combustible [1].

Estas celdas de combustible están constituidas por dos electrodos, un electrolito y placas bipolares:

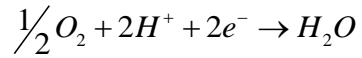
- Electrodos: Compuestos por ánodo y cátodo, en el primero se produce una reducción y en el segundo una reacción.

Reacción en el ánodo:

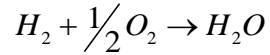




Reacción en el cátodo:



Reacción global:



- Electrolito: Como se comentó anteriormente, la principal función de estos es la de separar los gases, dejando pasar los iones  $H^+$  al cátodo y separando a los  $e^-$ .
- Placada bipolares: Estas separan las celdas y ayudan en la conducción de los gases, para finalmente evacuar los fluidos resultantes en el proceso.

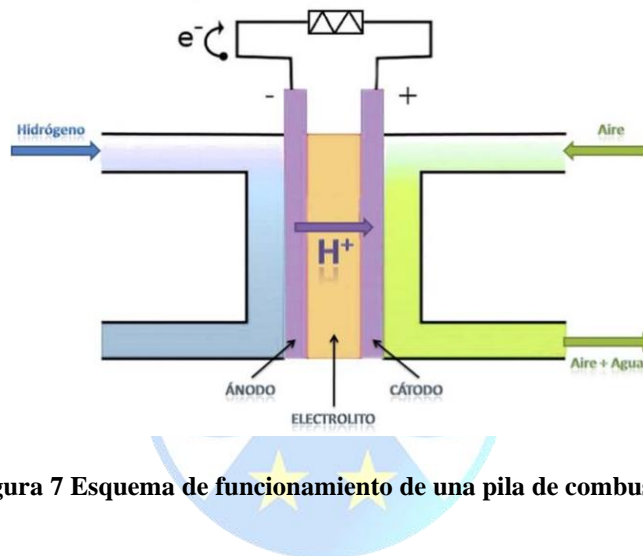


Figura 7 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible

Fuente: [7].

En el lado del ánodo, el hidrógeno que llega se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, pero los electrones están forzados a viajar por un circuito externo (lo que produce energía) ya que la membrana esta aislada eléctricamente. En el catalizador del cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones (los que son conducidos a través del circuito externo) y protones forman el agua. Que trae como consecuencia residuos que pueden ser agua o vapor de agua.

### 3.2.2 Tipos de pila de combustible

Generalmente las pilas de combustible se clasifican por el electrolito que utilizan. Esto determina el tipo de reacción química que se produce en las celdas (pilas), el tipo de catalizador que se necesita para tener la reacción, el combustible que se requiere para el proceso y el rango de temperaturas en las cuales la celda puede operar [8].

**Tabla 2: Detalles de tipos de pilas de combustible**

<b>Tipo de pila</b>	<b>Electrolito</b>	<b>T° de operación</b>	<b>Rango de potencia</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Aplicaciones</b>
PEMFC	Membrana de polímero solido	60-80[°C]	5-250[kW]	-Baja temperatura, corrosión y mantenimiento -Arranque rápido	-Transporte. -Portátiles. -Residenciales.
AFC	Solución alcalina	100-120[°C]	5-150[kW]	-Reacción catódica rápida -Mayor eficiencia	-Espaciales
PAFC	Ácido fosfórico	200-250[°C]	50[kW]-11[MW]	-Acepta H2 impuro	-Generación eléctrica distribuida y calor
MCFC	Carbonatos fundidos	600-700[°C]	100[kW]-2[MW]	-Reformado interno -Cogeneración	-Generación eléctrica distribuida y calor
SOFC	Oxido solido	800-1.000[°C]	100-250[kW]	-Reformado interno -Cogeneración	-Generación eléctrica distribuida y calor
DMFC	Membrana de polímero solido	50-120[°C]	5[kW]	-No necesita reformador de combustible	-Portátiles

Fuente: Centro Nacional del Hidrógeno (España).

### 3.2.3 Aplicaciones de pilas de combustible

Las tres principales aplicaciones para las pilas de combustible son las siguientes:

- Aplicaciones portátiles: Esta completamente orientada a dispositivos eléctricos de menor tamaño, que son cada día más abundantes en el mundo, como, por ejemplo: Smartphones, electrodomésticos de pequeño tamaño, computadores, entre otros [1].
- Aplicaciones estacionarias: Tras tener el combustible almacenado (recordando que el principal combustible es el hidrógeno), pueda utilizarse para la generación de electricidad y calor en empresas, hospitales, zonas residenciales y como generadores de potencia en casos de emergencia [1].
- Aplicaciones al transporte: Consiste en utilizar el hidrógeno como combustible en pilas de combustible para vehículos eléctricos de todo tipo. En este caso esto está en etapa de prototipos, ya que cada día aparecen nuevos modelos de autos, buses, aviones y barcos. Incluso en partes del mundo está prevista la comercialización tanto de auto como de buses en los próximos años [1].



**Figura 8 Avioneta eléctrica con pilas de combustible de hidrógeno**

Fuente: [1].

### 3.3 Conclusión

Se detallaron los principales usos, el funcionamiento y los tipos existentes en el mercado de la pila de combustible, lo que ayuda a entender cómo se podría llevar a cabo el sistema necesario para alimentar una subred solo con energía limpia, esto sería un gran avance y ayudaría de buena manera a reducir la contaminación global que existe en el planeta, trayendo como consecuencia una disminución del calentamiento global, si es que se aplica a gran escala.



## 4 ISLA MOCHA

### 4.1 Introducción

Lugar específico del cual trata este trabajo de título y donde se evalúa la posibilidad de contar con este tipo de energía para la producción de energía eléctrica, debido a que es una subred que se encuentra aislada del SEN, por lo cual no posee conexión al sistema eléctrico de Chile continental. Así es como se entra al detalle de que para producir electricidad se utilizan combustibles fósiles, gas y petróleo.

Conociendo esto, se indaga en las condiciones climáticas, el consumo eléctrico y otros detalles que son necesarios conocer para plantear como construir una red eléctrica de energía limpia y sustentable para alimentar a la isla.

### 4.2 Desarrollo

La Isla Mocha es una isla situada frente a las costas de la provincia de Arauco en la región del Biobío, Chile y cuenta con aproximadamente 800 habitantes.

Con aproximadamente 48[km<sup>2</sup>], posee una pequeña cadena montañosa que va de Norte a Sur y separa la isla en zona Este y Oeste. El punto más alto de la isla es de 390[m] sobre el nivel del mar.



**Figura 9** Costa oeste de Isla Mocha.

Fuente: Google Imágenes.

#### 4.2.1 Condiciones climáticas

El clima en la isla se define como templado húmedo de carácter oceánico, esto debido a que tiene precipitaciones durante todo el año. La media anual de estas precipitaciones es de 1.255[mm], pero entre enero y febrero vive un periodo en el cual las precipitaciones declinan, y con más fuerza en el lado Este de la isla.

Su temperatura media anual es de 12,5[°C]. Según datos de la empresa WINDFINDER, el viento va en dirección SSO y la velocidad promedio es de este 6[m/s]. También informa la temperatura del aire en la zona, la cual es de 13[°C] durante el día y disminuyendo a 12[°C] durante la noche. Estas estadísticas se basan en un intervalo de tiempo desde el 06/2013 hasta el 08/2021 [9].



Figura 10 Información del viento de Isla Mocha

Fuente:[9].

Es válido mencionar para estudios de producción que la parte alta de la isla (dentro de la Reserva Nacional Isla Mocha) posee una laguna de agua dulce, la cual se utiliza para abastecer de agua a la población.

#### 4.2.2 Abastecimiento y distribución de energía eléctrica

Antes del año 2011, el abastecimiento general de la isla era la producción de energía eléctrica a través de petróleo. Luego, en el año 2014, se autorizó el proyecto denominado “Ingeniería Sistema Interconexión Isla Mocha” que lo realizó la empresa ENAP, a la que se le daba la facultad de regular, conectar y medir unos posos de gas natural para utilizarlos en la generación de energía eléctrica, a través de dos generadores, el primero SCANIA de 250[kVA] y el segundo MWM de 90[kVA]. Como respaldo en caso de algún problema de suministro se mantuvo el generador a diésel John Deere capaz de generar 275[kVA] [10].

Al año 2017, en la isla existían 257 clientes del sistema eléctrico, de los cuales 247 eran hogares de los habitantes y 10 no residenciales, entre lo que destaca la posta de salud,

la escuela, la oficina de la armada, etc. Según el anexo TE 1 N°627.645 la generación de la isla en el año 2011 era de 200[kW] [10].

**Tabla 3: Sistema de distribución de la Isla Mocha**

Datos de la isla	Valores
Consumo Total de la Isla (2017)	220.181[kWh]
Consumo Promedio de la Isla (mensual)	78[kWh]
Red de media tensión (28 kilómetros de longitud)	13,2[kV]
Red de baja tensión (8 kilómetros de longitud)	380/220[V]

Fuente: [11].

- Red de media tensión: Término que se usa para referirse a instalaciones eléctricas con tensión nominal de 1-36[kV]
- Red de baja tensión: Término que se utiliza para referirse a instalaciones de corriente alterna menor o igual a 1[kV] y corriente continua menor o igual a 1,5[kV]. También se le da este nombre a la capacidad de generación eléctrica para consumo propio.

### 4.3 Conclusión

Se contextualizaron las condiciones climáticas de la isla, las cuales dan pie para estudios de prefactibilidad de instalaciones de métodos de generación de energía limpia en la isla, como lo es la energía eólica, ya que el promedio del viento en los últimos 8 años es rentable para la instalación de aerogeneradores, los cuales son la parte primordial de la producción dicha energía. Esta podría ser utilizada para producir electricidad.

También se da a conocer la información de abastecimiento y distribución de energía eléctrica de la isla, dando a conocer un sistema bastante anticuado, el cual requiere de una actualización.

## **5 AEROGENERADORES**

### **5.1 Introducción**

La parte esencial de la energía eólica, junto con el viento, son los aerogeneradores, que son necesarios para utilizar la energía del viento y transformarla en energía eléctrica, para que esta esté disponible para el uso del ser humano.

A continuación, se expondrán sus principales características, sus métodos de operación, funcionamiento y utilidad a nivel nacional.

### **5.2 Desarrollo**

Los aerogeneradores son aparatos que transforman la energía cinética del viento en energía mecánica y, por último, en electricidad. Son máquinas parecidas a los molinos de viento utilizados ampliamente durante el siglo XX [3].

Para su funcionamiento, requieren de un alternador y un mecanismo interno ubicado dentro de sus hélices. Antes de realizar una instalación de aerogeneradores, es indispensable hacer un estudio geográfico para así poder determinar la mejor zona para llevar a cabo su instalación y, de esta manera, reducir los riesgos medioambientales además de contar con un mayor rendimiento de energía eléctrica.

Comúnmente se puede pensar que los aerogeneradores tienen un precio elevado, pero esto se contrapone a su durabilidad, ya que sus periodos de duración y trabajo son muy extensos, lo que permite recuperar la inversión de una forma muy rápida y además trae otras ventajas como la disminución de impactos ambientales.



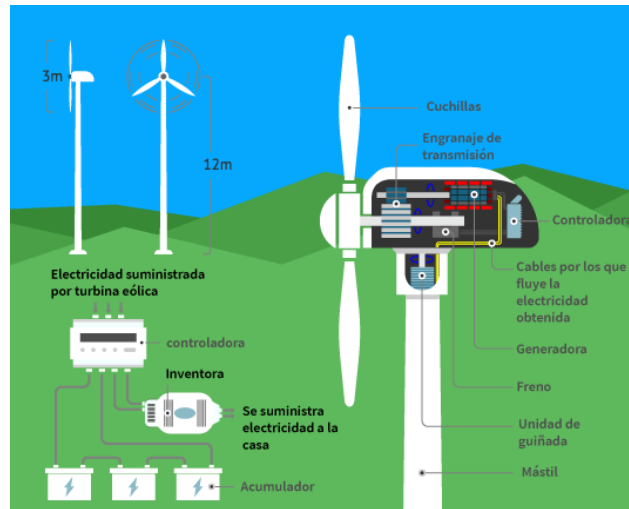


Figura 11 Partes del aerogenerador.

Fuente: [12].

### 5.2.1 Componentes de Aerogeneradores

1. Góndola: Parte de la torre donde se encuentra el mecanismo principal. Se ubica a la altura del centro donde giran las aspas y está conformado por: el generador, sus frenos, el mecanismo de giro, la caja de cambios y los sistemas de control.
2. Buje: Componente dentro del rotor que transmite la energía hacia el generador. Si se cuenta con una caja multiplicadora, el buje se conecta en el árbol de velocidad baja; en cambio si la turbina es de conexión directa, el buje tendrá que transmitir la energía directamente al generador.
3. Álabes: Aspas o palas que resisten grandes cargas de energía. Se encargan de capturarla del viento y la convierten en rotación dentro del buje. El aire produce una sobrepresión en la parte inferior y un vacío en la parte superior, generando una fuerza de empuje que logra que el rotor gire. La mayoría de los modelos de aerogeneradores tienen tres álabes, de esta manera son más eficientes para producir energía en grandes turbinas eólicas. Su diámetro suele ser de 40 y 80[m].
4. Palas de aerogenerador: Otra de las partes indispensables en el sistema. Para instalarlas se apoyan dos o más palas de manera vertical sobre el rotor, su diseño es simétrico y semejante a las alas de un avión, de esta forma se

encargan de recolectar la energía del viento y transformar este movimiento lineal en un movimiento de rotación que posteriormente el generador convierte en electricidad.

5. Torre de celosía: Utiliza la mitad del material de la torre tubular, por lo que es menos costosa; no obstante, estas torres están fabricadas con acero soldado y muchas personas prefieren adquirir aerogeneradores más estéticos.
6. Torre tubular: Pieza ocupada por los grandes aerogeneradores. Su manufactura va en secciones de 20 a 30[m] y está fabricada en acero, lo que la hace más resistente, su diámetro aumenta conforme se acerca a la base con el objetivo de incrementar su resistencia y ahorrar material.
7. Torre del aerogenerador: Es la parte del aerogenerador que soporta todo el peso del sistema. Esta estructura posibilita la transformación de la energía del viento en electricidad. Para garantizar el proceso utiliza una pieza conocida como turbogenerador que se sitúa en la parte superior. Existen torres de aerogeneradores más de 80[m] de altura que se denominan macro turbinas y cuya capacidad es de varios megavatios de potencia.
8. Base del aerogenerador: Pieza fundamental que le sirve al aerogenerador para anclarse en el suelo. Para lograrlo, la base necesita ser muy resistente y construirse sobre una cimentación subterránea de hormigón armado, de esta manera podrá sujetarse al terreno y soportar las cargas de viento y la vibración presentes dentro del aerogenerador.

### 5.2.2 Funcionamiento del aerogenerador

Todo comienza cuando una corriente de viento hace girar las aspas del aerogenerador y estas comienzan a rotar sobre su propio eje ubicado dentro de la góndola. Gracias a que el eje o buje está conectado a la caja de cambios, comienza a aumentar la rapidez del movimiento de rotación y proporciona energía al generador, el cual ocupa campos magnéticos para convertir esta energía rotacional en energía eléctrica [13].

El último paso antes de llegar a las redes de distribución es atravesar un transformador que se ajusta a la cantidad de energía necesaria. Esto se debe a que el voltaje que se produce puede ser demasiado.

### 5.2.3 Modelos de aerogeneradores

En el mercado actual existen dos principales modelos de aerogeneradores:

1. Aerogeneradores de eje vertical (VAWT): La principal ventaja de esta clase de aerogenerador es que no necesitan de ningún mecanismo de orientación, que se utiliza para girar la turbina en la dirección contraria al viento.

Por otro lado, su desventaja es que van sujetos directamente en el suelo y producen menor energía que los de eje horizontal, ya que cuando trabajan producen resistencia en las turbinas [14].

Existen diferentes tipos de estos de aerogeneradores:

- Turbina eólica eje vertical Savonius: Es el modelo más simple. Consiste en un cilindro hueco partido por la mitad donde ambas mitades se desplazan con el objetivo de formar una “S”. Las partes cóncavas de esta captan el viento, mientras que los reversos, representan una resistencia mínima al viento. Comúnmente giran en el sentido que menos resistencia ofrece.

Su principal aplicación es el bombeo de agua, es decir una aplicación de tipo mecánica. Todo esto debido a que solo se puede utilizar en bajas velocidades [15].



**Figura 12** Turbina eólica de eje vertical de Savonius.

Fuente: Google Imágenes.

- Turbina eólica eje vertical Darrieus: Es el modelo de aerogeneradores de eje vertical más exitoso comercialmente. Permite mayores velocidades que la turbina anterior, pero no llega a ser competencia para las de rotores de eje horizontal. Estos tipos se utilizan para evitar construir hélices sofisticadas como las que usan los de eje horizontal [15].



**Figura 13 Turbina eólica de eje vertical de Darrieus.**

Fuente: Google Imágenes.

- Turbina eólica eje vertical Darrieus tipo H: Este modelo consiste en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que puede salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. A diferencia del de Darrieus original, este tiene la capacidad de comenzar a girar por sí mismo, ya que está equipado con palas verticales que pueden cambiar su orientación a medida que se produce el giro del rotor para sacar un mejor provecho de la fuerza del viento [15].



**Figura 14 Turbina eólica de eje vertical de Darrieus tipo H.**

Fuente: Google Imágenes.

- Turbina Gorlov: La característica principal de este modelo es que su rotor es helicoidal. Su principal ventaja con respecto a los anteriormente mencionados es que este reduce las ondulaciones que se producen en los álabes y que la forma en la que está construida es más amigable con la vida marina [15].



**Figura 15 Turbina eólica de Gorlov.**

Fuente: Google Imágenes.

2. Aerogeneradores de eje horizontal (HAWT): Actualmente son los más utilizados, ya que permiten separar cada parte del aerogenerador según las necesidades del instalador (personal de empresas que los instala). Además, gracias a esto se pueden hacer cálculos más eficientes y planear la construcción de parques eólicos. Su principal característica es que se giran las palas en dirección perpendicular a la velocidad del viento. La velocidad de giro de las turbinas es inversamente proporcional al número de palas que tiene. Esto se puede explicar de la siguiente manera, una aeroturbina rápida es aquella en la que la componente de sustentación es mayor que la componente de resistencia, dando lugar a unas velocidades específicas altas [16].

Estos se pueden clasificar en aeroturbinas lentas y rápidas.

- Aeroturbinas lentas: Suelen tener entre 6 y 24 palas, lo que les confiere elevados pares de arranque y reducida velocidad de giro. Al igual que la turbina eólica de eje vertical Savonius, su principal aplicación es el bombeo de agua, esto se define como una aplicación del tipo mecánica.



**Figura 16 Aeroturbina lenta.**

Fuente: Google Imágenes.

- Aeroturbinas rápidas: Suelen tener entre 2 y 3 palas siendo las más utilizadas las de 3 palas ya que poseen un perfil aerodinámico muy útil en cualquier situación climática. Esto les hace ser los más útiles para poder generar energía eléctrica.

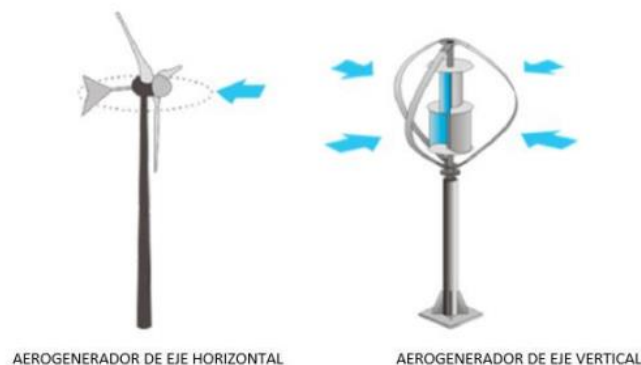


**Figura 17 Aeroturbina rápida.**

Fuente: Google Imágenes.

Estas aeroturbinas también poseen una clasificación, la cual se realiza por la posición del rotor:

- Barlovento: En esta posición del rotor, el viento incide inicialmente sobre el este y luego sobre la torre.
- Sotavento: En cambio en esta posición del rotor el viento incide primero sobre la torre y para luego incidir en el rotor.



**Figura 18** Clases de aerogeneradores.

Fuente: Google Imágenes.

**Tabla 4:** Comparación de tipos de aerogeneradores.

Tipos de Aerogeneradores	Ventajas	Desventajas
De eje horizontal (HAWT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Su altura permite acceder a fuertes corrientes de viento.</li> <li>-Cada una de las palas recibe la potencia el viento en cualquier punto de rotación.</li> <li>-Posee una alta eficiencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Requiere una construcción solida de la torre (base) para soportar el peso de la góndola.</li> <li>-Requiere un sistema de control adicional de Yaw para orientar las palas hacia el viento.</li> <li>-Costos logísticos de instalación y manteamiento.</li> </ul>
De eje vertical (VAWT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No requiere un sistema de control Yaw para orientar las palas contra el viento.</li> <li>-El generador, el tren de engranaje y los transformadores se instalan a dos niveles del suelo.</li> <li>-Captan mejor el viento que los de eje horizontal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Las velocidades del viento a nivel suelo son bajas, por lo que la potencia del viento será baja.</li> <li>-Objetos muy grandes cercanos al suelo y al aerogenerador pueden provocar turbulencias que provocan vibraciones y causar estrés en los componentes de este.</li> </ul>

Fuente: [16].

### 5.2.4 Tipos de aerogeneradores según su velocidad de rotación

Los aerogeneradores se pueden dividir en dos clases de acuerdo con su velocidad. Estas pueden ser de velocidad fija (FSWT) y de velocidad variable (VSWT) [16].

En la figura 19, se adjunta una gráfica que muestra la relación de la velocidad del generador comparada con la potencia eléctrica producida.

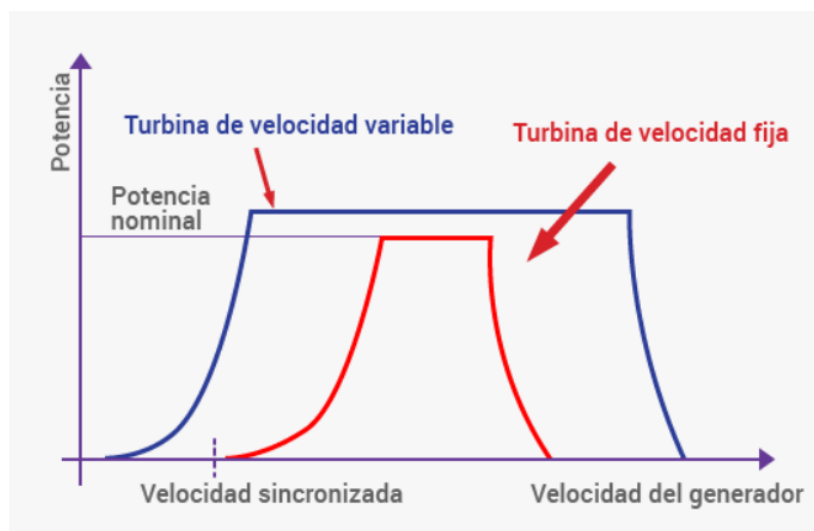


Figura 19 Velocidad respecto a potencia eléctrica producida.

Fuente:[16].

Aquí se puede observar que las aeroturbinas de velocidad variable pueden producir mayor cantidad de energía en un rango de velocidades de viento más amplio.



**Tabla 5: Comparación de FSWT y VSWT.**

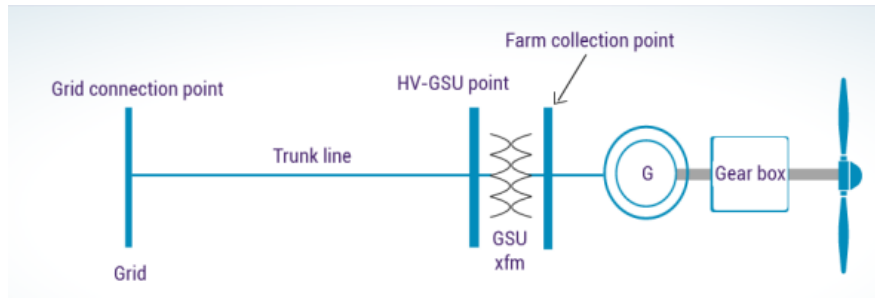
Velocidad de rotación	Ventajas	Desventajas
Velocidad fija	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Debido a que es uno de los primeros diseños, se utiliza muy poco o en pequeños.</li> <li>-El generador no requiere escobillas.</li> <li>-Simple de operar.</li> <li>-Costos reducidos.</li> <li>-Mantenimiento casi inexistente.</li> <li>-Generador muy resistente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se daña constantemente el tren de engranajes y el eje de transmisión, por los cambios de dirección e intensidad del viento.</li> <li>-Impacto en la flora y fauna muy elevado (poseen un alto % de aves colisionando con las aspas).</li> <li>-Contaminación visual y sonora, por sus altas velocidades.</li> </ul>
Velocidad variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Producen energía eléctrica incluso en velocidades bajas. Su salida (potencia) puede ser regulable en muchas velocidades.</li> <li>-La velocidad del generador ajustable, para obtener mayor eficiencia aerodinámica.</li> <li>-Impacto en la flora y fauna casi nulo, ya que, al operar en velocidades bajas, las aves no colisionan.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La potencia del viento es baja debido a la baja velocidad de viento a nivel suelo.</li> <li>-La principal desventaja es que son objetos demasiado grandes que están ubicados muy cerca del suelo, lo que provoca estrés en los componentes de estos.</li> </ul>

Fuente: [16].

### 5.2.5 Configuración de turbinas eólicas

A continuación, se detallarán las diferentes configuraciones de las turbinas:

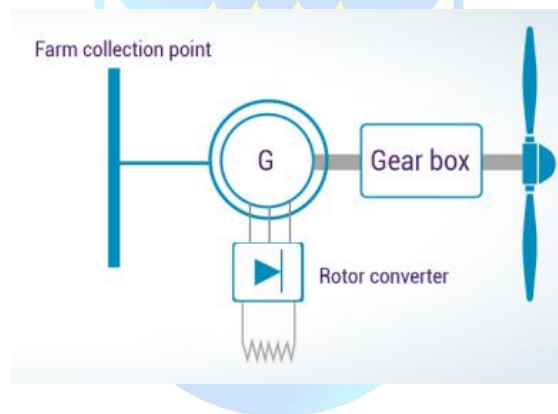
1. **Tipo 1:** Este tipo de turbina posee un generador de inducción conectado de manera directa a la red sin conversión de potencia eléctrica. El sistema tiene un tren de engranaje que convierte los movimientos de velocidad baja en las palas en una velocidad más alta, que ayuda a producir energía eléctrica [16].



**Figura 20 Configuración de turbinas tipo 1.**

Fuente: [16].

2. Tipo 2: El segundo tipo de configuración consiste en un generador que posee un rotor bobinado (anillo deslizante). La principal ventaja de este tipo es que el convertidor posee la capacidad de regular la potencia consumida por la resistencia del rotor [16].



**Figura 21 Configuración de turbinas tipo 2.**

Fuente: [16].

3. Tipo 3: Este tipo posee un generador de inducción de rotor devanado con dos convertidores, los cuales tienen la función de inyectar y ajustar el voltaje en el circuito del rotor para así poder ajustar el cambio de fase y la frecuencia.

Cabe mencionar que ambos convertidores actúan como rectificadores (AC-DC) e inversores (DC-AC). También dentro de esta configuración, el generador posee un rango de acción flexible y de un nivel de control muy bueno, todo esto en base a que puede producir energía eléctrica a bajas velocidades de viento [16].

Finalmente es necesario aclarar que en la actualidad este es el tipo de configuración más utilizado, normalmente se conoce como DFIG.

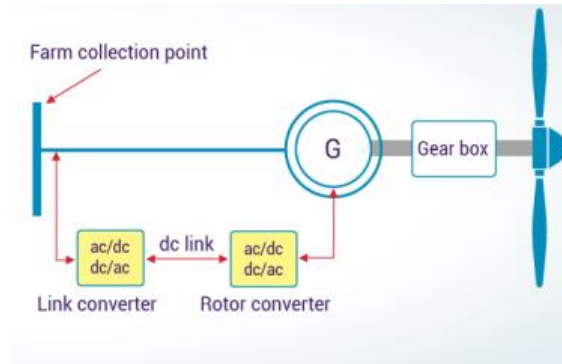
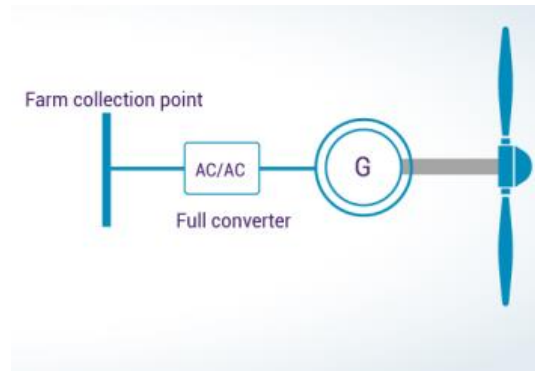


Figura 22 Configuración de turbinas tipo 3.

Fuente: [16].

4. Tipo 4: Este es el tipo más barato de los 5 que se presentan, ya que no posee tren de engranajes, una de las piezas más caras del aerogenerador. Conociendo esto se puede explicar que el sistema tiene un generador sincrónico con imanes permanentes (generador de inducción). Ante la falta de tren de engranajes, esto se suple con una configuración multipolar (múltiples polos) del generador, para así reducir la velocidad de sincronía.

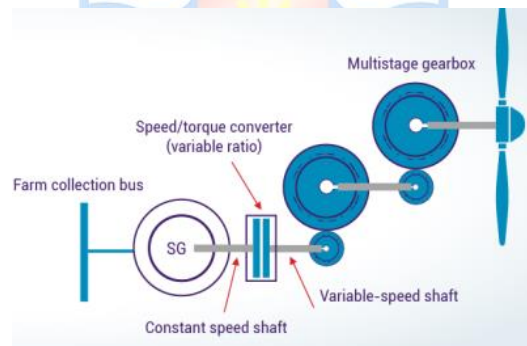
Cabe destacar que, en este tipo de turbina, el convertidor toma una posición más importante que en el resto, esto debido a que la frecuencia de potencia de salida es variable porque la velocidad del viento también lo es y estas son proporcionales, lo cual trae como consecuencia que no se pueda conectar de manera directa el generador a la red. Por ende, el convertidor debe transformar la potencia de salida en una frecuencia que sea fija, para así poder ser inyectada en la red de una forma segura [16].



**Figura 23 Configuración de turbinas tipo 4.**

Fuente: [16].

5. Tipo 5: La principal característica de este tipo es que posee un generador sincrónico, que se encuentra conectado a un sistema de engranajes múltiple. También posee un convertidor de torque/velocidad el cual es casi idéntico al de la transmisión de los autos. Todo lo anteriormente explicado ayuda al generador a girar a una velocidad totalmente independiente de la velocidad que lleva el tren de engranaje [16].



**Figura 24 Configuración de turbinas tipo 5.**

Fuente: [16].

### 5.2.6 Emplazamiento de aerogeneradores

Para poner un campo eólico, existen cuatro conceptos básicos y que son esenciales, estos son “los efectos aceleradores”, comúnmente conocidos como efecto túnel y efecto de colina, la influencia de los obstáculos, la densidad del aire y la rugosidad del terreno los cuales se explicarán a continuación [3]:

- Rugosidad del terreno: Esta es inversamente proporcional a la variación que posee el viento por la zona, con esto se quiere decir que mientras más grande sea la rugosidad del terreno mayor será la disminución de la velocidad del viento. Posee dos parámetros que son característicos:
  - Clase de Rugosidad: Escala cualitativa de las condiciones en las que se encuentra el terreno, esta escala va de 0 a 4, siendo 0 el mejor caso y 4 el peor caso, ya que el terreno presenta una gran oposición al viento.
  - Longitud de la Rugosidad: Escala cuantitativa que da un valor a los obstáculos, así lo son los bosques y las grandes ciudades (Nivel 2-3-4) ralentizan el viento, mientras que las superficies de agua tienen una influencia mínima sobre el viento (0-1).
- Densidad del Aire: La energía cinética del viento depende en una relación proporcional de la densidad del aire, esto se explica cómo su masa por unidad de volumen. A presión atmosférica normal y a una temperatura de 15[°C] la densidad del aire es de 1,225[kg/m<sup>3</sup>].

Cabe mencionar que esta densidad varía con respecto a la humedad y al calor, aumentando en el caso de la humedad y disminuyendo en el del calor.
- Efectos aceleradores: Se define como la influencia del contorno del terreno. Es más fácil de explicar con un ejemplo. Si se elige un lugar estrecho, por ejemplo, entre montañas, el aire tiende a comprimirse en la parte alta de estas, ya que está expuesta al viento, lo que produce un efecto acelerador, este se conoce como “Efecto Túnel”. Por otro lado, el “Efecto de la Colina”, se define como el aumento de la velocidad del viento y la densidad de este al atravesar una colina o la cima de una montaña, pero esto trae una consecuencia la cual se explica como una disminución en la velocidad y densidad del viento al pasar fuera de las cimas de montaña o colina.
- Influencia de los obstáculos: En áreas cuya superficie es muy accidentada se producen turbulencias (flujos de aire, ráfagas, remolinos y vórtices) que cambian tanto en velocidad como en dirección del viento. Las turbulencias disminuyen la posibilidad de utilizar la energía del viento de forma efectiva en un aerogenerador, así como también provocan mayores roturas y desgastes en la turbina eólica. Adicionalmente, cuando el obstáculo se sitúa a menos de un kilómetro de una turbina, se produce un

efecto de frenado del viento que aumenta con la altura y la longitud del obstáculo, este efecto es más pronunciado cerca del obstáculo y cerca del suelo.

Con todo lo anteriormente mencionado solo faltaría presentar las velocidades del viento que son útiles y cuales no para el emplazamiento de los aerogeneradores (es válido mencionar que estas pueden variar con respecto a su fabricación).

**Tabla 6: Calidad de emplazamiento de aerogeneradores en base a la velocidad del viento.**

Velocidad	Clasificación
Bajo 4[m/s]	No útil
Entre 4-8[m/s]	Regularmente bueno
Entre 8-14[m/s]	Muy bueno
Entre 14-20[m/s]	Excelente
Superior a 20[m/s]	No sirve

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.7 Eficiencia de los Aerogeneradores

Para poder contextualizar de una buena manera la eficiencia que poseen los generadores eólicos, se necesita explicar un tema principal y fundamental en esto. Cuando se quiere hablar de la eficiencia lo principal es el factor de planta.

- Factor de planta: También se puede llamar “factor de capacidad” y este, de una central eléctrica, es el cociente entre la energía real que se genera en la central eléctrica durante un periodo de tiempo y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante todo este mismo periodo de tiempo. Comúnmente los aerogeneradores tienen un factor de planta que va desde un 10% a un 40%, es de vital importancia aclarar que este factor jamás podrá ser del 100% por diversas causas, de las cuales algunas se enumeran a continuación:
  1. La mantención y fallas de los aerogeneradores.
  2. La intermitencia o irregularidad de la fuente de energía (en este caso el viento).
  3. Pérdidas debido a equipos eléctricos.

$$F_{Cap} = \frac{E_{Rg} \cdot t}{E_{ig} \cdot t} \quad (1)$$

Cabe destacar que el factor de planta o de capacidad de un aerogenerador, no incide directamente en el factor de eficiencia de un campo eólico, ya que el factor de eficiencia de un campo eólico se puede definir como la cantidad de tiempo que puede producir electricidad durante un periodo de tiempo dividido por la cantidad de tiempo en dicho periodo [4].

### 5.2.8 Campos de aerogeneradores(eólicos) en Chile

En Chile existen muchos parques eólicos, a marzo del 2022 el 12 % de la energía total instalada en el país es energía eólica, la cual se produce en los campos de aerogeneradores.

A continuación, se presenta una lista con los 10 más grandes, información que se encuentra disponible en la página del Ministerio de Energía de Chile.

1. Parque Eólico San Juan, se ubica en la Región de Atacama, específicamente en Freirina.
2. Parque Eólico El Arrayan, se encuentra en Ovalle, Región de Coquimbo.
3. Parque Eólico Sierra Gorda, ubicado en Sierra Gorda, Región de Antofagasta.
4. Parque Eólico Los Cururos, también se encuentra en Ovalle, Región de Coquimbo.
5. Parque Eólico Taltal, ubicado en Taltal, Región de Antofagasta.
6. Parque Eólico Talinay oriente, ubicado en Ovalle, Región de Coquimbo.
7. Parque Eólico Valle de Los Vientos, se Ubica en la Región de Antofagasta, específicamente en Calama.
8. Parque Eólico Renaico, Región de la Araucanía, específicamente en Renaico.
9. Parque Eólico San Pedro II, se encuentra ubicado en Dalcahue, Región de Los Lagos.
10. Parque Eólico Talinay Poniente, ubicado en Ovalle, Región de Coquimbo.

También es válido mencionar que Chile el Año 2021 anuncio la construcción del parque eólico más grande de Latinoamérica, ya que tendrá una capacidad instalada de 780[MW], el nombre del parque será “Horizonte” y se ubicará en la Región de Antofagasta, específicamente en Taltal.

El campo eólico contara con 140 aerogeneradores, lo que generara una media anual de 2.400[GWh], algo así como el consumo de 700.000 hogares de chilenos. Esto también permitirá evitar la emisión de cerca de 1,2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

### 5.2.9 Avances en Aerogeneradores

Los aerogeneradores se utilizan desde hace muchos años, y con el paso del tiempo se han ido descubriendo e implementando nuevas tecnologías en la fabricación, para poder hacerlos más eficientes y menos invasivos con el medio ambiente.

- Aerogeneradores marinos flotantes: En Europa, más específicamente en Dinamarca y Reino Unido, ya existen varios parques eólicos marinos, los cuales se construyen con flotadores y se anclan al suelo marino. La principal ventaja de estos aerogeneradores es su ubicación, al estar en el mar el viento es más constante, lo que los hace más productivos.



**Figura 25 Walney Extension, Reino Unido.**

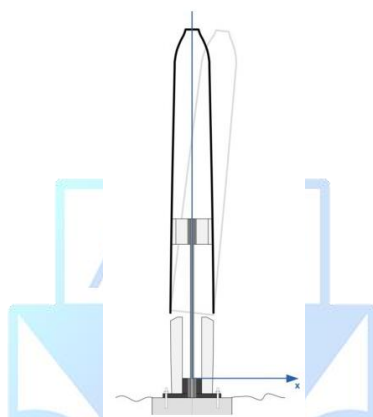
Fuente: Google Imágenes.

- Aerogeneradores sin aspas: La compañía Vortex Bladeless en el año 2018 comenzó la planeación y estudios para la creación que finalmente fue un proyecto que financio la Unión Europea, ya que este tipo de aerogenerador es totalmente diferente a los convencionales, esto se debe principalmente a que se basan en la resonancia aeroelástica, aprovechando la energía eólica por medio de un fenómeno de aparición de vórtices llamado Vortex Shedding. Esto consiste en un cilindro fijo vertical sobre una varilla que es elástica, la que se ancla al suelo, el cilindro oscila en un rango de



velocidad de viento que, posteriormente, transforma la energía mecánica en electricidad mediante un alternador. En otras palabras, es una turbina eólica que no es una turbina en realidad.

Es más, se puede decir que este tipo de aerogenerador se asemejan más a los paneles solares que a los aerogeneradores convencionales, debido a sus características y rentabilidad. Su principal ventaja sobre el resto de los aerogeneradores es la rentabilidad y su vida útil que es más larga [15].



**Figura 26 Aerogenerador Vortex Tacoma.**

Fuente: [17].

### 5.3 Conclusión

Se contextualizo todo lo necesario con respecto a los aerogeneradores, lo que ayudará a entender la energía eólica, ya que son de fundamental importancia debido a que, sin la existencia de estas instalaciones, no habría como poder transformar la fuerza del viento en energía. De igual manera se contextualizaron las partes del aerogenerador, las diferentes maneras de clasificarlos, junto con lo que se necesita para ser emplazados.

Para finalmente dar una visión general de los campos de aerogeneradores que existen en Chile y el potencial que tiene el país para la implementación de estos. Lo anterior, servirá para abrir el contexto del tema de la energía eólica que viene en el siguiente capítulo.

## 6 ENERGIA EÓLICA

### 6.1 Introducción

La energía eólica es una fuente de energía renovable que se obtiene de la energía cinética del viento. El estudio de esta energía como fuente de generación de energía eléctrica se ha visto fuertemente desarrollada por la conciencia de los seres humanos para hacer uso de energías renovables no convencionales (ERNC) como lo es la eólica.

Debido a este gran interés, muchas investigaciones y estudios se han desarrollado en torno al tema. Sin embargo, en ocasiones sigue siendo tecnológicamente más costosa que otras fuentes de energías, por lo cual muchos investigadores están buscando desarrollar nuevas técnicas y tecnologías para lograr que el proceso de conversión sea más eficiente y menos costoso.

### 6.2 Desarrollo

Como ya se explicó la energía eólica se obtiene del viento. El cual es uno de los recursos energéticos más antiguos explotados por los seres humanos y, hoy en día, es la energía más madura y eficiente de todas las energías renovables.

Esta consiste en convertir la energía que produce el movimiento de las palas de un aerogenerador impulsadas por el viento en energía eléctrica.

La energía eólica suministrada actualmente es más del 5% del consumo total mundial de electricidad y según la Agencia Internacional de la Energía, se prevé que para el año 2040 esta cubrirá el 9% de la demanda eléctrica mundial y más del 20% en Europa. En cuanto a Chile, de la capacidad total instalada, el 12 % viene de suministros eólicos.

Las tecnologías que se han desarrollado hasta el día de hoy para poder utilizar este recurso como fuente energética producen nulas emisiones durante su operación y su funcionamiento se basa en las turbinas que transforman la energía cinética del viento, en energía mecánica. Luego, la energía mecánica producida se vuelve a transformar, pero esta vez en energía eléctrica, esto gracias a un generador.

La vida útil de los aerogeneradores instalados en los campos eólicos va desde los 20 hasta los 25 años y se pueden clasificar como campos eólicos Onshore y campos eólicos Offshore.

- **Campos eólicos Onshore:** Son campos eólicos emplazados en tierra. Estos se instalan normalmente en aéreas rurales despobladas, para evitar que el ruido moleste a los habitantes.

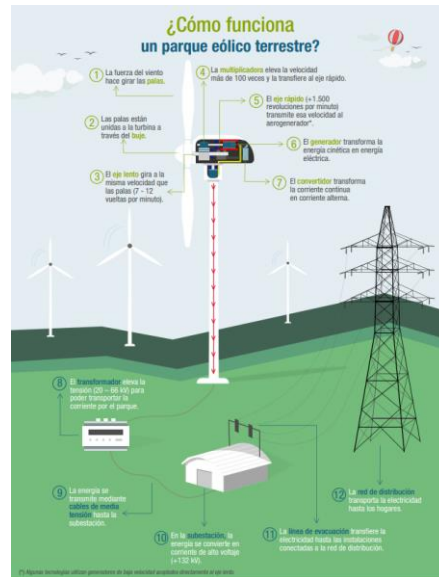


Figura 27 Ejemplo de campo eólico onshore.

Fuente:[18].

- **Campos eólicos Offshore:** Son campos eólicos pero emplazados en el mar, en los cuales la energía cinética se transporta a través de unos cables enterrados en el fondo del mar hacía unos transformadores que la convierten en tensión de alto voltaje lista para el consumo.



Figura 28 Campo eólico offshore.

Fuente: Google Imágenes.

Las principales diferencias entre estos dos tipos de campos eólicos son las siguientes:

1. Los del tipo Offshore poseen mejor aprovechamiento, al estar emplazados en el mar no encuentra obstáculos y esto trae como beneficio que el viento se desplaza a velocidades superiores y más constantes.
2. Los del tipo Offshore tienen una instalación que tiene menos trabas ya que se pueden colocar en superficies más amplias y usar turbinas de mayor tamaño y potencia.
3. Los del tipo Offshore al estar ubicados en el mar, tienen un impacto tanto acústico como visual menor que los Onshore
4. Los del tipo Onshore tienen una instalación más fácil, ya que los Offshore se ubican en zonas de agua profunda, lo que hace más complicado el traslado de piezas, etc.

A continuación, se adjunta una tabla comparativa entre las ventajas y desventajas de la Energía eólica en general.

**Tabla 7: Ventajas/ desventajas de la energía eólica.**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Energía Renovable y limpia	Límite de velocidad del viento para funcionamiento de campos eólicos.
Energía duradera en el tiempo.	Donde se ubica el campo eólico se deben construir líneas de alta tensión
Se puede adaptar a casi cualquier espacio	Posee impacto medioambiental, tanto visual como acústico
Una instalación bastante rápida, en comparación con otras energías.	El área utilizada para la implementación de los campos eólicos.
Es una energía de bajo costo.	Al depender de la velocidad del viento, es difícil planificar con seguridad cuanta energía se producirá.

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.1 Velocidad del viento y proyectos en Chile

El gobierno de Chile tiene a su disposición una herramienta web llamada “Explorador Eólico” la cual es de libre acceso para cualquier persona que quiera utilizar sus datos. Tiene detalles muy útiles sobre el recurso viento en Chile. Contiene información recopilada de más de 40 años. Y posee una aplicación para realizar cálculos estimados de aerogeneradores de una forma muy rápida y simple.

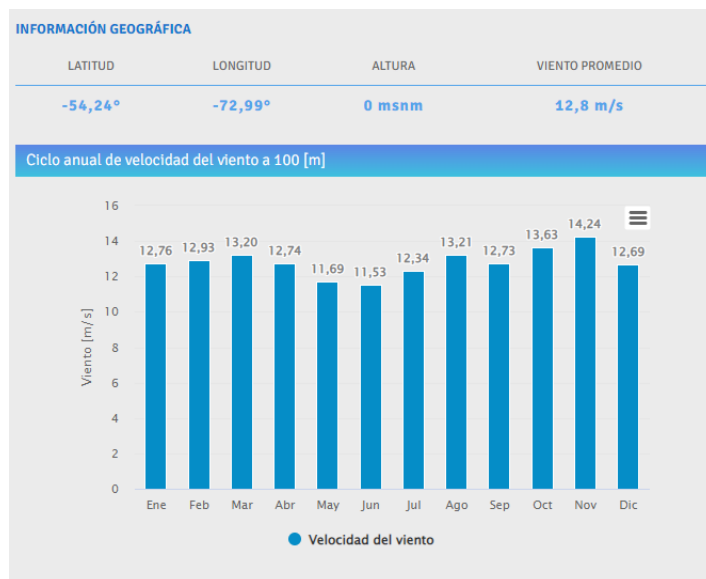
A continuación, se puede observar el mapa detallado de vientos en Chile.



**Figura 29 Mapa Explorador Eólico**

Fuente: [19].

Como se puede ver en la figura 29, Chile es un país que tiene una posición ventajosa en términos de velocidad de viento, a lo largo de todo el país, pero en base a la escala de velocidades de viento, se puede observar que en la parte sur (donde se ve la zona más rosada), la velocidad promedio es adecuada para el trabajo de los aerogeneradores ya que posee un promedio de 12,8 [m/s], este promedio se obtuvo en un intervalo de tiempo entre los años 1980-2017.



**Figura 30** Ciclo anual de velocidad del viento para zona sur (Región de Magallanes).

Fuente: [19].

También se aprecia en la figura 29, que la costa de la Región del Biobío posee un promedio muy bueno para el trabajo de los aerogeneradores y posterior obtención de energía eléctrica. Ya que tiene un promedio de 9,8[m/s] en el mismo intervalo de tiempo mencionado anteriormente.



**Figura 31** Ciclo anual de velocidad del viento para zona centro-sur (Región del Bio Bio).

Fuente: [19].

Se procede a adjuntar la escala para definir los niveles de viento



**Figura 32 Escala de vientos.**

Fuente: [19].

Como se puede observar en la figura 32 el color blanco significa una velocidad del viento bastante diminuta, lo cual para efectos de obtención de energía eólica en base a aerogeneradores sería inútil. Luego, pasando por el color azul que sería la velocidad mínima para el funcionamiento de los aerogeneradores, posteriormente avanzando por diferentes colores que significan otras velocidades, llegando finalmente al rosado, que es el máximo de la escala, que en promedio son vientos en los cuales los aerogeneradores pueden funcionar de una manera espectacular, lo que produce una buena cantidad de energía eólica.

Cabe destacar que en Chile recientemente se están implementando, parques eólicos en la zona sur, esto debido a su difícil acceso, ya que la gran mayoría de los parques eólicos se encuentran en la zona norte.

También es necesario mencionar que el sistema energético eléctrico de Chile se separa en tres partes:

- SEN
- SEA
- SEM

La capacidad energética de electricidad total instalada en Chile asciende a la cifra de 27.188,83[MW], de los cuales 2.858,55[MW] son producto de la energía eólica, de los cuales 2.700,07[MW] son producidos en el SEN, lo que equivale al 99,33% de la energía eólica total producida en Chile, del otro 0,67% se producen 116[MW] en el SEM y 66[MW] en el SEA, todo lo anterior según la Comisión Nacional de Energía. Es válido también destacar que los datos son establecidos en noviembre del 2021 [20].

En la figura 33 se puede apreciar unas gráficas de la capacidad energética eléctrica instalada de la Comisión Nacional de Energía.

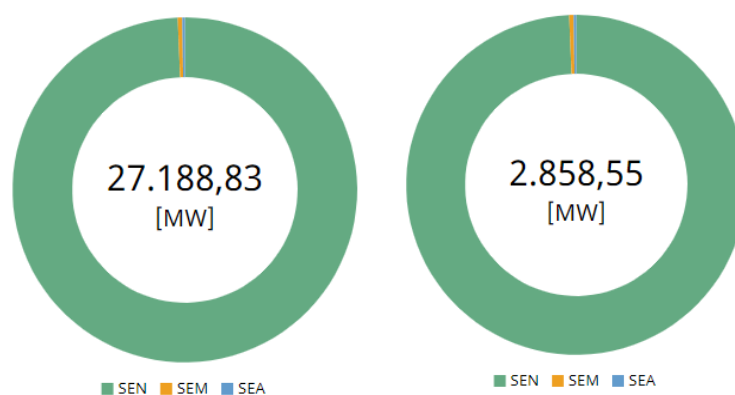


Figura 33 Capacidad total instalada y capacidad eólica instalada.

Fuente: [20]

A continuación, se detalla la cantidad de energía producida por los parques eólicos más grandes de Chile, información que se obtuvo de la página del Ministerio de Energía Nacional.

Tabla 8: Energía producida por los 10 parques eólicos más grandes de Chile.

Parque eólico	Potencia Bruta	Zona eléctrica del país en el que se ubican
San Juan	193[MW]	SEN
El Arrayan	115[MW]	SEN
Sierra Gorda	112[MW]	SEN
Los Cururos	109,6[MW]	SEN
Taltal	99[MW]	SEN
Talinay oriente	90[MW]	SEN
Valle de Los Vientos	90[MW]	SEN
Renaico	88[MW]	SEN
San Pedro II	65[MW]	SEN
Talinay Poniente	60,6[MW]	SEN

Fuente: Ministerio de Energía, Chile.



### 6.3 Conclusión

Se da a conocer el panorama mundial sobre energía eólica en Chile, destacando la buena disposición eólica que posee el país, esto gracias a su geografía, al ser un país con extensas costas, las velocidades del viento son muy buenas para el desarrollo de este tipo de energía. También se presentan los tipos y la gran cantidad de parques eólicos que existen hasta el momento instalados en distintos lugares de Chile, y su detalle energético.



## **7 Evaluación**

### **7.1 Introducción**

Se realizan los estudios y cálculos de la cantidad de aerogeneradores que se necesitan para alimentar de buena forma a la población de la isla junto con la industria productora de hidrógeno verde. Teniendo la consideración de los tiempos en los cuales la producción de electricidad en base a el viento se encuentra imposibilitada por los temas climáticos, los cuales dejan los aerogeneradores fuera de servicio.

### **7.2 Desarrollo**

Primero se realizan los cálculos para ver la cantidad en [kWh] que un aerogenerador podrá producir en un año. Es necesario recordar que el consumo energético de la isla anual es de 220.181[kWh] y el consumo de la planta productora de hidrógeno es de 50,1[kWh] por cada kilogramo de hidrógeno que se produce.

El modelo de aerogenerador a utilizar será el General Electric GE 1.5s, cuyo costo no es muy elevado y su producción es bastante buena en velocidades de viento no tan altas. y para la planta productora de hidrógeno en la isla se utilizará un modelo HyProvide X-Series.

#### **7.2.1 Evaluación de aerogenerador**

Para evaluar el aerogenerador y la producción de éste, se utilizaron los datos de la velocidad del viento que están disponibles en la página Explorador Eólico del gobierno de Chile de los años 2015, 2016 y 2017.

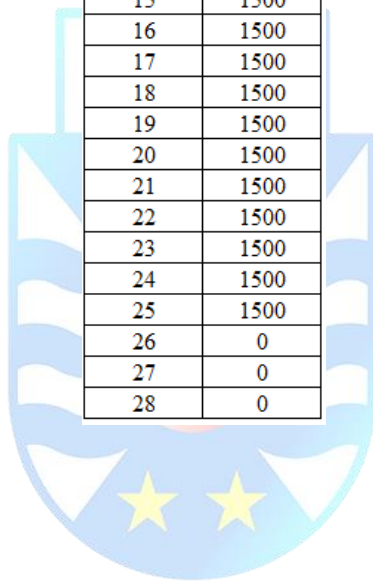
En estos datos por cada hora del día se tomaron 15 muestras de las velocidades del viento, por lo que se obtuvo un promedio de cada hora de cada día de los 3 años anteriormente mencionados.

Con esto y con las especificaciones técnicas del modelo de aerogenerador se puede obtener un aproximado de la cantidad de [kWh] que se podrían producir con este en la isla y así tener claro la cantidad de aerogeneradores necesarios para producir la energía requerida.

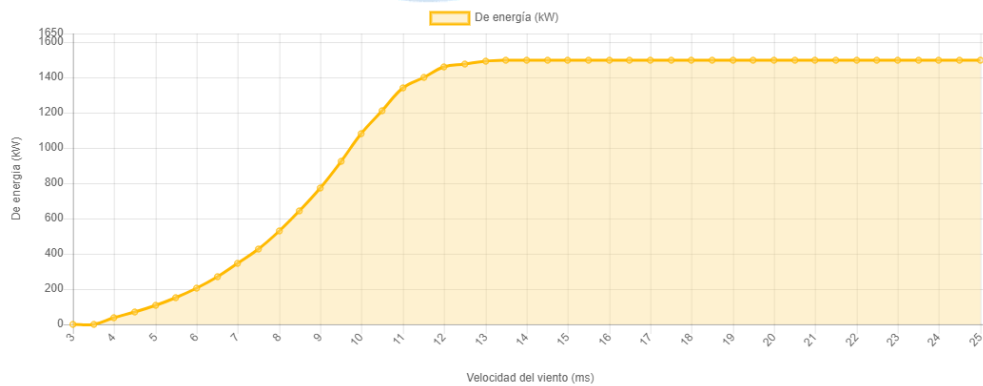
Primero se adjuntan las especificaciones técnicas de producción de [kWh] del aerogenerador con respecto a una cierta velocidad del viento, las que se muestran en la tabla 9 y se grafican en la figura 34.

**Tabla 9: Potencia producida en el aerogenerador por velocidad del viento**

m/s	kW
0	0
1	0
2	0
3	0
4	38,5
5	104
6	205
7	344
8	528
9	744
10	1079
11	1342
12	1460
13	1494
14	1500
15	1500
16	1500
17	1500
18	1500
19	1500
20	1500
21	1500
22	1500
23	1500
24	1500
25	1500
26	0
27	0
28	0



Fuente: [21].



**Figura 34 Especificaciones del aerogenerador.**

Fuente: [21].

A continuación, se adjunta las tablas de elaboración propia 10, 11 y 12 que muestran la producción de energía eléctrica en [kWh] del aerogenerador seleccionado para este trabajo de título, a partir de los datos estadísticos del viento obtenidos del explorador eólico [19], para los años 2015, 2016 y 2017

**Tabla 10 Generación de energía para el 2015**

2015				
Rang. Infe	Rang. Sup	frecuencia	kW	kWh
0	1	158	0	0
1	2	436	0	0
2	3	565	0	0
3	4	699	0	0
4	5	740	38,5	28490
5	6	750	104	78000
6	7	760	205	155800
7	8	723	344	248712
8	9	704	528	371712
9	10	627	774	485298
10	11	639	1079	689481
11	12	546	1342	732732
12	13	398	1460	581080
13	14	327	1494	488538
14	15	209	1500	313500
15	16	169	1500	253500
16	17	127	1500	190500
17	18	69	1500	103500
18	19	26	1500	39000
19	20	30	1500	45000
20	21	24	1500	36000
21	22	26	1500	39000
22	23	3	1500	4500
23	24	1	1500	1500
24	25	3	1500	4500
25	26	1	1500	1500
26	27	0	0	0
27	28	0	0	0
			0	4891843

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 11 Generación de energía para el 2016.**

2016				
Rang. Infe	Rang. Sup	Frecuencia	KW	KWH
0	1	169	0	0
1	2	577	0	0
2	3	741	0	0
3	4	783	0	0
4	5	745	38,5	28682,5
5	6	830	104	86320
6	7	701	205	143705
7	8	713	344	245272
8	9	758	528	400224
9	10	687	774	531738
10	11	560	1079	604240
11	12	564	1342	756888
12	13	364	1460	531440
13	14	248	1494	370512
14	15	150	1500	225000
15	16	78	1500	117000
16	17	56	1500	84000
17	18	32	1500	48000
18	19	11	1500	16500
19	20	6	1500	9000
20	21	7	1500	10500
21	22	4	1500	6000
22	23	0	1500	0
23	24	0	1500	0
24	25	0	1500	0
25	26	0	1500	0
26	27	0	0	0
27	28	0	0	0
		0		4215021,5



Fuente: Elaboración propia.

Todas estas aproximaciones se realizaron en base a separar las velocidades del viento en intervalos de 1[m/s], para así obtener la cantidad de las horas del año que tuvieron cada uno de estos intervalos de velocidades.

Por ejemplo, como se muestra en las tablas 10 y 11, en el intervalo de 0[m/s]-1[m/s] del año 2015, se detectaron 158 horas en el que se registraron velocidades contenidas dentro de este intervalo. En cambio, en el año 2016, se obtuvieron 169 horas contenidas en este intervalo.

**Tabla 12 Generación de energía para el 2017**

2017				
Rang. Infe	Rang. Sup	Frecuencia	KW	KWH
0	1	138	0	0
1	2	431	0	0
2	3	672	0	0
3	4	808	0	0
4	5	782	38,5	30107
5	6	770	104	80080
6	7	718	205	147190
7	8	641	344	220504
8	9	645	528	340560
9	10	587	774	454338
10	11	655	1079	706745
11	12	575	1342	771650
12	13	432	1460	630720
13	14	310	1494	463140
14	15	194	1500	291000
15	16	112	1500	168000
16	17	87	1500	130500
17	18	51	1500	76500
18	19	33	1500	49500
19	20	31	1500	46500
20	21	37	1500	55500
21	22	27	1500	40500
22	23	6	1500	9000
23	24	7	1500	10500
24	25	3	1500	4500
25	26	2	1500	3000
26	27	2	0	0
27	28	4	0	0
		0		4730034



Fuente: Elaboración propia.

De las últimas tres tablas se puede apreciar que los resultados de producción de energía eléctrica en [kWh] son bastantes satisfactorios.

En base a esto, se adjuntan los valores aproximados en [kWh], para poder conocer cómo sería la producción de los aerogeneradores con los registros de velocidades del viento.

**Tabla 13: Producción aproximada en años 2015, 2016 y 2017**

Año	Cantidad
2015	4.891.843[kWh]
2016	4.215.022[kWh]
2017	4.730.034[kWh]

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, en términos de horas en las cuales no se podría producir, se obtuvo un promedio de los datos obtenidos de los años anteriores, lo que dejó los siguientes resultados:

**Tabla 14: Cantidad de horas sin funcionamiento.**

<b>Año</b>	<b>Cantidad de horas</b>	<b>Cantidad de días</b>
2015	1.858	77
2016	2.270	96
2017	2.055	86
Promedio	2.061	86

Fuente: Elaboración propia.

Para entrar más en detalle, se buscan las horas continuas en las que los aerogeneradores no pueden funcionar, en este caso, las dos mayorías de cada año son las que se adjunta en la tabla 15:

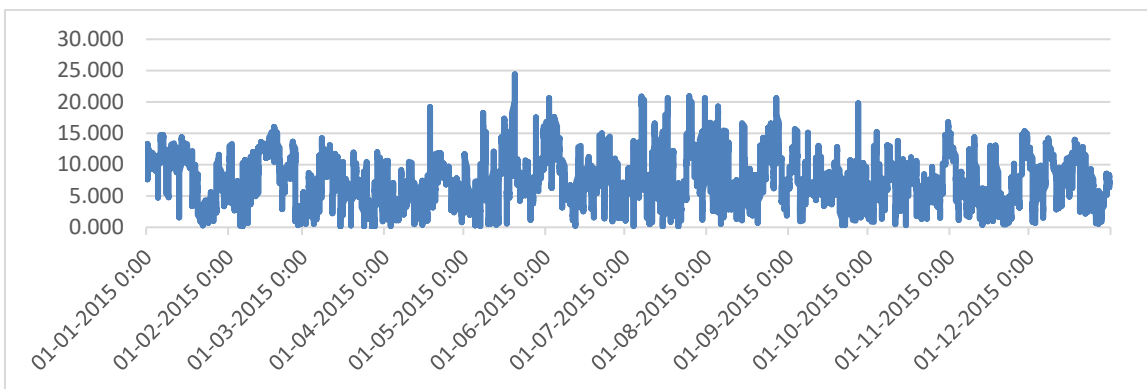
**Tabla 15: Cantidad de horas sin funcionamiento continuas**

<b>Año</b>	<b>1° mayor cantidad de horas</b>	<b>2° mayor cantidad de horas</b>	<b>Doble de promedio Total</b>
2015	79	54	134
2016	86	64	150
2017	84	47	142
Promedio	83	56	142

Fuente: Elaboración propia.

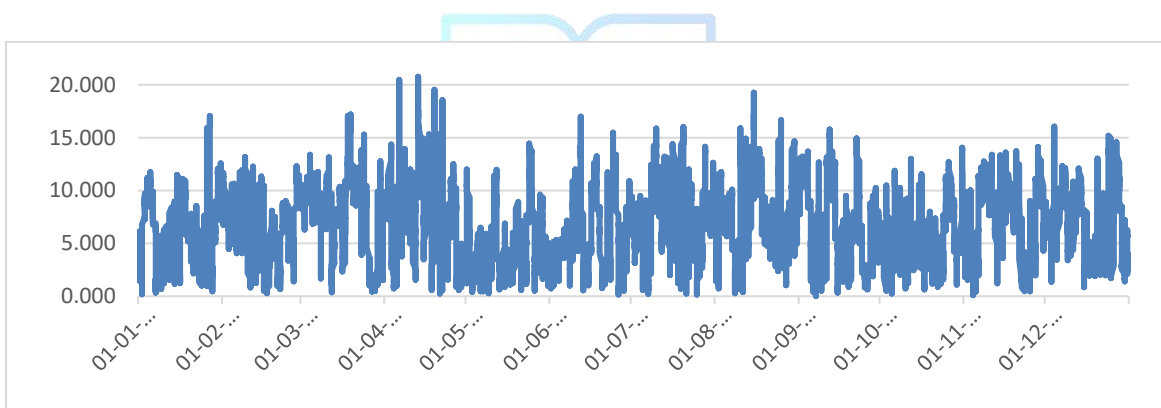
Es necesario multiplicar la cantidad de horas en la que no pueden operar para adelantarse a un caso bastante más complejo, y así no tener a la población sin electricidad.

Esta cantidad de horas se obtuvo con Excel desde los gráficos que se adjuntan a continuación:



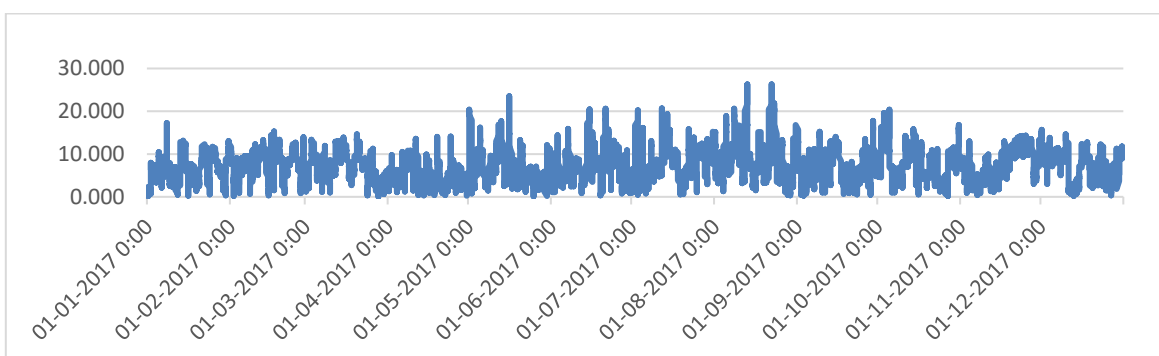
**Figura 35 Velocidades del viento año 2015.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 36 Velocidades del viento año 2016**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 37 Velocidades del viento año 2017.**

Fuente: Elaboración propia.



Con el modelo de aerogenerador que se seleccionó solo basta uno para satisfacer la demanda energética de isla, y es superada por mucho. Pero se deja al debe la cantidad de aerogeneradores, ya que aún falta calcular la cantidad de kWh que se requieren para producir el hidrogeno que se utilizara.

#### 7.2.1.1 Posible ubicación de los aerogeneradores

Revisando la imagen satelital de la isla, se pudo determinar una posible ubicación del parque eólico, que se encuentra demarcada en la figura 38.

Uno de los principales motivos para la toma de esta decisión, es que encuentra alejada de la zona residencial, por lo que la contaminación acústica que generaría el parque no afectaría a la población de la isla. Además, se ve que es una zona pareja y cerca de la orilla del mar, por lo que no debería de haber obstáculos que disminuyan la velocidad del viento que le llegaría a los aerogeneradores.

Pensando a futuro, la zona está bien ubicada para el caso donde sea necesario una ampliación del parque e incluso para la instalación de una planta desalinizadora.



**Figura 38** Ubicación ideal para el parque eólico.

Fuente: Google Earth.

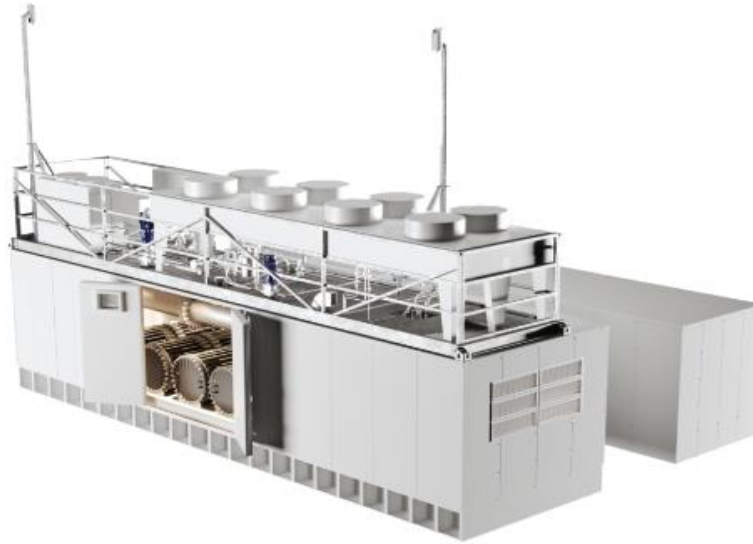
### 7.2.2 Evaluación de planta productora de hidrógeno

Con los aerogeneradores se podría producir la suficiente energía eléctrica para abastecer a la isla de manera apta para la realización de la vida cotidiana, pero como se dejó ver en los resultados anteriores, habría en promedio unas 2.061 horas en las cuales estos no podrían producir energía, lo que dejaría a la isla sin el suministro por algo así como 86 días. Es por esto por lo que se necesitó una manera de poder producir energía eléctrica de forma alternativa, y aquí es donde entra el hidrógeno ya que, con la utilización de un electrolizador alcalino, se puede producir una buena cantidad de este.

La empresa GHS produce electrolizadores alcalinos que son técnicamente portátiles, están hechos específicamente para la producción de hidrógeno en lugares aislados, y son ideales para este caso, ya que están diseñados para trabajar con cargas variables (como las que se producen con los aerogeneradores).

Respecto a los costos energéticos, se tiene la información de que para producir 1[kg] de hidrógeno se necesitan 50,1[kWh], por lo tanto, se debe considerar cuánta energía produce una pila de combustible con 1[kg], para así obtener el costo energético aproximado que tendría suplir los aerogeneradores con hidrógeno mientras estos no puedan operar.

Además, como beneficio adicional, se puede almacenar este hidrógeno de manera gaseosa, ya que el almacenamiento líquido es comúnmente utilizado cuando se debe transporta una cierta distancia.



**Figura 39 Electroizador reducido.**

Fuente: [22].

**Tabla 16: Datos técnicos electroizador**

Datos	Cantidades
Presión de salida	35[bar]
Consumo de agua	8-12 [l/kg] de hidrógeno
Rango de producción de hidrógeno	107[kg/h]
Eficiencia de la planta	69%-73%

Fuente: [23].

En base a lo anterior, se deben calcular primero los gastos energéticos para poder producir el hidrógeno, junto a los gastos de recursos hídricos para la misma producción.

Es bien sabido que, para producir un [kg] de hidrógeno, se requieren 8-12 litros de agua, es por esto por lo que se debe calcular la cantidad exacta de hidrógeno a producir para poder asumir de una forma acertada la cantidad de litros de agua que se deben destinar para dicha producción.

### 7.2.3 Evaluación planta de almacenamiento

Consiste en evaluar la compresión y posterior almacenamiento tanto del oxígeno como hidrógeno cuando salen del electrolizador.

Para el hidrógeno se utilizará el modelo de compresor 1KS 50 de la marca española Hiperbaric. La elección de este compresor es en base a que el electrolizador seleccionado entrega el hidrógeno con una presión de salida de 25 bar y el Hiperbaric 1KS 50 tiene como presión de admisión un intervalo que va de 20-40 bar y su presión de salida es mayor a 500 bar, y la celda seleccionada trabaja con una presión mínima de 250 bar, por lo cual funcionarían de una forma bastante correcta.

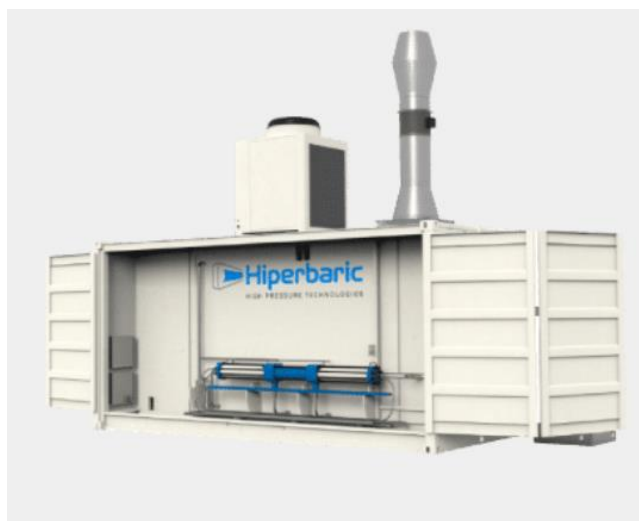


Figura 40 Compresor Hiperbaric

Fuente:[24].

Tabla 17: Especificaciones compresor Hiperbaric

Modelo	Hiperbaric 1KS 50
Presión de admisión	20-40[bar]
Presión de salida	>500[bar]
Caudal	33,32[kg/h]

Fuente: [24].

Para la compresión del oxígeno se utilizará un compresor de la empresa china Wenling Toplong Electrical-Mechanical Co. Que es suficiente para lo que se requiere en el proyecto.



**Figura 41 Compresor de oxígeno**

Fuente: Google imágenes.

**Tabla 18: Especificaciones compresor de oxígeno**

Variable	Valor
Presión de admisión	1[bar]
Presión de salida	165[bar]
Caudal	2.000[m <sup>3</sup> /h]

Fuente: [25]

Para el almacenamiento se necesitan tanques que sean capaces de resistir las presiones de los gases como el hidrógeno y oxígeno, en este caso los elegidos son los de la empresa china STRENGTH Equipaments.



**Figura 42 Estanque para gases**

Fuente: [26].

#### **7.2.4 Evaluación pila de combustible a utilizar**

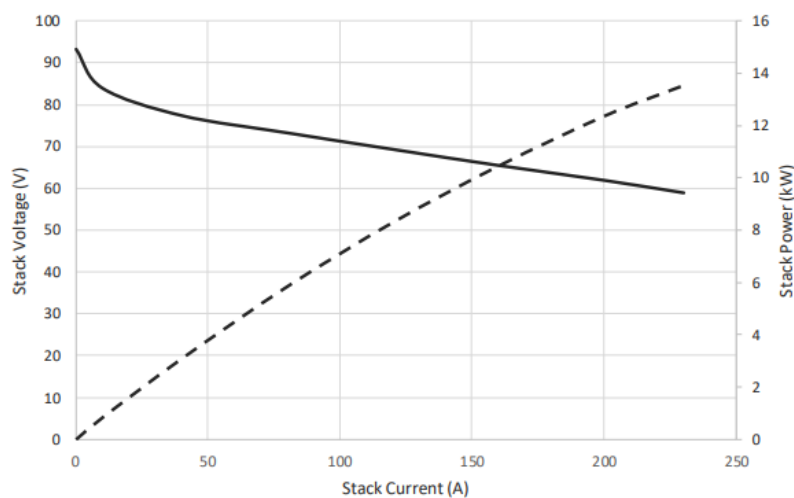
Tomando en consideración la forma en que se puede producir el hidrógeno, ahora es necesario utilizar este para producir la energía eléctrica para la población de la isla. Aquí es donde se necesitan las pilas de combustible, de las cuales la empresa Nedstack produce una gran variedad. Entre los modelos a disposición se encuentran el FCS 7-XXL, FCS 10-XXL, FCS 13-XXL y el FCS Specials. De los modelos anteriormente enunciados se decidió utilizar el modelo FCS 13-XXL ya que, en términos de potencia necesaria, se acercan bastante a la potencia requerida por la isla, lo que significaría disminuir la cantidad de pilas a utilizar, que trae como consecuencia una menor inversión en la compra de dichas pilas.



**Figura 43 Pila de combustible.**

Fuente: [27].

Las especificaciones técnicas de potencia, voltaje y corriente producida se indican a continuación:



Current (A)	0	40	80	120	160	200	230
Stack Voltage (V)	93.2	77.4	73.2	69.3	65.5	61.9	58.9
Stack Power (kW)	0.0	3.1	5.9	8.3	10.5	12.4	13.6

Figura 44 Especificaciones técnicas de la pila.

Fuente:[28].

De los valores de la figura 44, se tomaron los de la 5ta columna, esto debido a que de esta manera no se desgastará la pila, lo que permitiría alargar la vida útil de esta misma.

Tabla 19: Valores pila de combustible seleccionada

Variable	Valor
Corriente[A]	160
Voltaje[V]	65,5
Potencia[kW]	10,5

Fuente:[28].

### 7.2.5 Cálculos de cantidades necesarias a utilizar en el proyecto

Ahora bien, sabiendo que se requieren 220.181[kWh] de energía dentro de la isla en un periodo de un año, se puede calcular la cantidad de potencia necesaria por hora, conociendo estos datos se puede tomar en consideración la cantidad de pilas a utilizar.

Primero, se divide la cantidad en días para saber el gasto diario:

$$\frac{220.181}{365} \approx 604[\text{kW}] \quad (2)$$

Luego, conociendo esto se obtiene la cantidad por hora que se necesitaría.

$$\frac{604}{24} \approx 25[\text{kW}] \quad (3)$$

Por consecuencia, en base a lo anterior, se necesita una potencia de 25[kW] por hora para poder producir la energía necesaria para abastecer a la isla por un día o la cantidad de días que sea necesario.

Teniendo en cuenta lo que se acaba de dar a conocer, es necesario recapitular datos que se utilizaran a continuación como, por ejemplo:

- Cantidad de horas sin funcionamiento de los aerogeneradores: En este caso son 2.061, lo que equivale a 86 días aproximadamente.
- Cantidad de horas continuas sin funcionamiento: En este caso son 142 horas seguidas sin funcionamiento, lo que equivale a un aproximado de 6 días.
- Potencia requerida por hora: 25[kW].
- Potencia entrada por la pila de combustible: 10,5[kW]
- Voltaje entregado por la pila de combustible: 65,5[V]

El voltaje en el cálculo de la cantidad de pilas a utilizar no es un dato que tenga una relevancia muy grande, ya que se necesita alcanzar una cantidad demasiado elevada, por lo cual se va a necesitar la ayuda de otros elementos tales como transformadores e inversores.

Con lo anteriormente expuesto, en términos de potencia, si se requiere una cantidad de pilas específicas para satisfacer la demanda de la isla, en este caso se calculó de la siguiente manera:

$$\frac{P.necesaria}{P.producida} \rightarrow \frac{25}{10,5} = 2,38 \quad (4)$$



Se necesitarían 2,38 pilas, pero en base a que la población de la isla, se espera que vaya aumentando este valor se puede dejar en 3, ya que si aumenta la población el consumo energético de la isla también aumentara.

Conociendo el número de pilas que se requieren conectadas en serie para producir la potencia que se requiere, también se puede obtener el voltaje que estas producirán el cual es del valor de:

$$65,5 \cdot 3 = 196,5[V] \quad (5)$$

Teniendo en consideración todo lo anterior, se necesita calcular. Lo primero es la cantidad de hidrógeno requerido en las pilas para poder producir la energía para alimentar a la isla durante todo el año.

Según los datos del fabricante la pila, necesita un flujo mínimo de hidrógeno de 72[NL/min] y un flujo máximo de 154[NL/min]. Estos son los rangos de flujo que permiten un funcionamiento correcto de la pila.

Ahora bien, es necesario aclarar que la unidad de medida [NL/min]: el termino N no es de ninguna nomenclatura, solo hace alusión a la normalidad, es decir valores o variables que son normalizadas, en este caso es la forma de medir un caudal en unas condiciones específicas de temperatura, presión y humedad. Dicha condición normal establece los siguientes valores [29]:

**Tabla 20: Variables estándar**

Variable	Normalización	Equidad en unidades
Temperatura ambiente	273,15[°K]	0[°C]
Presión Atmosférica	760[mm Hg]	1[bar]
Humedad relativa	0%	0%

Fuente: Elaboración propia.

Luego, estos datos se utilizan en formulas, las cuales entregan factores de corrección del caudal, lo cual se multiplica por la cantidad de litros que se requieren obteniendo así el número de litros exactos, en este caso el factor es 1 al ser las condiciones perfectas las anteriormente mencionadas.

Por lo que  $N=1$ , lo que deja como resultado 1 [L/min].

Las ecuaciones para calcular los factores de corrección de cada variable y el factor de corrección total son las siguientes:

$$\text{Factor de temperatura} = 273,15 / \text{Temperatura del lugar} \quad (6)$$

$$\text{Factor de presión} = \text{Presión del lugar} / 760 \quad (7)$$

$$\text{Factor de humedad} = (760 - P_{\text{parcial}} * T^{\circ} * HR) / 760 \quad (8)$$

$$\text{Factor total} = \text{Factor de temperatura} * \text{Factor de presión} * \text{Factor de humedad} \quad (9)$$

**Tabla 21: Datos promedio de variables a utilizar en los factores de corrección**

Fecha	Promedio Humedad (%)	Promedio Presión Atmosférica (hPa)	Promedio Temperatura (°K)
Marzo 2022	84,00	1.018,74	300,15(27°C)
Febrero 2022	83,22	1.017,01	303,15(30°C)
Enero 2022	82,29	1.016,99	304,15(31°C)
Diciembre 2021	82,26	1.017,73	300,15(27°C)
Marzo 2021	85,06	1.017,77	298,15(25°C)
Febrero 2021	83,10	1.017,39	301,15(28°C)
Enero 2021	83,77	1.018,19	299,15(26°C)
Diciembre 2020	81,88	1.020,10	302,15(29°C)

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 22: Factores de corrección**

Fecha	Factor de Temperatura	Factor de Presión	Factor de Humedad	Factor Total
Marzo 2022	0,91	1,005	0,97	0,88
Febrero 2022	0,90	1,004	0,96	0,87
Enero 2022	0,89	1,004	0,96	0,87
Diciembre 2021	0,91	1,004	0,97	0,89
Marzo 2021	0,92	1,004	0,97	0,90
Febrero 2021	0,90	1,004	0,96	0,88
Enero 2021	0,91	1,005	0,97	0,89
Diciembre 2020	0,90	1,007	0,96	0,88
Promedio	0,90	1,005	0,96	0,88

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 22 se pueden obtener los factores de corrección total de los dos años, con este valor se procede a calcular el valor de flujo máximo o mínimo.

**Tabla 23: Factores de corrección total**

Año	Factor de corrección total
2022	0,87
2021	0,89

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que existe una diferencia de un 13% entre el caudal Normal y el caudal en condiciones ambientales del año 2022, mientras que existe una diferencia de un 11% entre el caudal Normal y el de condiciones ambientales del año 2021.

$$\text{Flujo mínimo 2021} = 0,89 \cdot 72 = 64,08 \quad (10)$$

$$\text{Flujo máximo 2021} = 0,89 \cdot 154 = 137,06 \quad (11)$$

$$\text{Flujo mínimo 2022} = 0,87 \cdot 72 = 62,64 \quad (12)$$

$$\text{Flujo máximo 2022} = 0,87 \cdot 154 = 133,98 \quad (13)$$

$$\text{Promedio flujo mínimo} = \frac{64,08 + 62,64}{2} = 63,36 \quad (14)$$

$$\text{Promedio flujo máximo} = \frac{137,06 + 133,98}{2} = 135,52 \quad (15)$$

**Tabla 24: Flujos mínimos y máximos que se pueden obtener por año**

<b>Año</b>	<b>Flujo mínimo</b>	<b>Flujo máximo</b>
2021	64,08 [L/min]	137,06[L/min]
2022	62,64[L/min]	133,96[L/min]

Fuente: Elaboración propia.

Al tener lo anterior en conocimiento, se puede obtener la cantidad de litros de hidrógeno necesario para poder alimentar la isla en las horas en que los aerogeneradores no pueden funcionar debido a las bajas velocidades de viento.

Primero se obtuvo un promedio de los flujos mínimos y máximos de ambos años:

$$\text{Flujo mínimo por hora} = 63,36 \cdot 60 = 3.801,6 \quad (16)$$

$$\text{Flujo máximo por hora} = 135,52 \cdot 60 = 8.131,2 \quad (17)$$

Estas cantidades se asumen como el flujo necesario de hidrógeno por hora. Ahora bien, para las 142 horas continuas sin funcionamiento de los aerogeneradores se requiere la siguiente cantidad de hidrógeno.

$$\text{Flujo mínimo} \rightarrow 3.801,6 \cdot 142 = 539.827,2 \approx 529.827 \quad (18)$$

$$\text{Flujo máximo} \rightarrow 8.131,2 \cdot 142 = 1.154.630,4 \approx 1.154.630 \quad (19)$$

Asumiendo lo anterior, se puede relacionar con los valores específicos del datasheet de la pila, lo que deja que el flujo mínimo de hidrógeno produce la primera columna de datos de la figura 44, mientras que el flujo máximo deja la última columna de la misma figura.

En base a esto, se realizó una regla de 3 simples para obtener la cantidad de hidrógeno necesaria para utilizar la pila de la manera que se opinó conveniente. Lo que deja como resultado lo que se enuncia a continuación:

$$1.154.630 \rightarrow 230$$

$$x \rightarrow 160 \quad (20)$$

$$x = 803.220,87 \approx 803.221[L] \quad (21)$$

Son necesarios 803.221 litros de hidrógeno para poder abastecer de energía eléctrica a la isla durante 142 horas consecutivas, en las cuales no se podrá producir energía de otra manera. Y para la totalidad de horas sin funcionamiento de aerogeneradores que es de 2.061 se requiere la siguiente cantidad:

$$5.656,48 \cdot 2.061 = 11.658.005,3 \approx 11.658.005[L] \quad (22)$$

Teniendo en cuenta los datos anteriores, es necesario volver a calcular el consumo energético total de la isla teniendo en cuenta ahora el gasto energético que conlleva la producción del hidrógeno necesario. Así que se requiere reutilizar datos como los siguientes:

- Consumo total de la isla (2017) = 220.181[kWh].
- Promedio producido por un aerogenerador = 4.612.300[kWh].
- Para producir 1[kg] de hidrógeno se requieren 50,1[kWh] y de 8-12 litros de agua.
- Consumo total de hidrógeno = 11.658.005 [L].
- Consumo parcial de hidrógeno = 803.221[L].

Para conocer el consumo energético adicional que tendrá la isla, lo primero es hacer la correcta conversión de litros a kilogramos de hidrógeno. Para realizarlo se requiere conocer la densidad del hidrogeno en condiciones normales, es decir, temperatura ambiente y presión estándar (1 [bar]), en este caso es de  $0,0709 \frac{kg}{L}$ .

Con lo anteriormente enunciado se puede presentar la siguiente ecuación, la que se utilizara para hacer las conversiones que se estimen convenientes.

$$kg = L \cdot 0,0709 \quad (23)$$

Teniendo en consideración la ecuación 23, se puede obtener la cantidad de kilogramos de hidrógeno a obtener para la producción de la energía requerida. Para el consumo parcial se necesitan:

$$1 \rightarrow 0,0708$$

$$803.221 \rightarrow x \quad (24)$$

$$x = 56.868,046 \approx 56.868 \quad (25)$$

Para el consumo total de hidrógeno se requieren:

$$1 \rightarrow 0,0708$$

$$11.658.005 \rightarrow x \quad (26)$$

$$x = 825.386,754 \approx 825.387 \quad (27)$$

Teniendo en cuenta los datos anteriores, se necesita durante el año un total de 825.387[kg] de hidrógeno para poder sustentar la isla durante el periodo que no operan los aerogeneradores. Es válido mencionar que esta cantidad es la total, la parcial es la cantidad más grande de horas continuas de no funcionamiento de los generadores eólicos, para la que se requieren 56.868[kg].

Esto al transformarlo en gasto energético queda de la siguiente forma:

$$\text{Consumo parcial de energía: } 56.868 \cdot 50,1 = 2.849.086,8 \approx 2.849.087[\text{kWh}] \quad (28)$$

$$\text{Consumo total de energía: } 825.387 \cdot 50,1 \rightarrow 41.351.888,7 \approx 41.351.889[\text{kWh}] \quad (29)$$

En base a la ecuación 29 se conoce la cantidad de energía total requerida para producir el hidrógeno necesario, lo anterior junto con la cantidad de energía requerida por la población de la isla, permite calcular la cantidad de aerogeneradores que son necesarios para el abastecimiento eléctrico de la isla.

En cuanto a la generación de energía eléctrica para la producción de hidrogeno se requiere la siguiente cantidad de aerogeneradores:

$$\frac{41.351.889}{4.321.678} = 9,48 \approx 10 \quad (30)$$

Por otra parte, para la generación eléctrica de la población se requiere solo 1 adicional, pero se agrega uno más para emergencias y edificios públicos que requieran estar conectados siempre a energía eléctrica, como por ejemplo la posta de salud.

En base lo anterior, se llega a la conclusión de que se requiere un total de 12 generadores eólicos.

Luego, se requiere obtener la cantidad de litros de agua necesarios para la producción de la cantidad de hidrógeno que se necesita:

$$\text{Consumo parcial de energía} \quad 56.868 \cdot 8 = 454.944[L] \quad (31)$$

$$56.868 \cdot 12 = 682.416[L] \quad (32)$$

$$\text{Consumo total de energía} \quad 825.387 \cdot 8 = 6.603.096[L] \quad (33)$$

$$825.387 \cdot 12 = 9.904.644[L] \quad (34)$$

En temas del oxígeno que se precisa para el funcionamiento de la pila, se requiere calcular el flujo mínimo y máximo para obtener la cantidad necesaria. Se puede volver a reutilizar el factor de corrección del H<sub>2</sub>V. Para calcular esto se demanda la información de flujo, la cual se muestra en la tabla 25:

**Tabla 25: Flujos estándar por fabricante**

Flujos	Cantidad
Mínimo	96[NL/min]
Máximo	732[NL/min]

Fuente: Elaboración propia.

Los factores de corrección son:

$$\text{Factor de corrección 2021: } 0,89 \quad 0,89 \cdot 96 = 85,44 \quad (35)$$

$$0,89 \cdot 732 = 717,36 \quad (36)$$

$$\text{Factor de corrección 2022: } 0,87 \quad 0,87 \cdot 96 = 83,52 \quad (37)$$

$$0,87 \cdot 732 = 636,84 \quad (38)$$

**Tabla 26: Flujos mínimos y máximos de aire necesario**

Año	Factor de corrección mínimo	Factor de corrección máximo
Promedio	84,54	677,1

Fuente: Elaboración propia.

Luego es necesario ver la cantidad de flujos por hora para poder calcular los flujos totales:

$$\text{Flujo mínimo: } 84,53 \cdot 60 = 5.072,4 \rightarrow 5.072,4 \cdot 142 = 720.280,8 \approx 720.281 \quad (39)$$

$$\text{Flujo máximo } 677,1 \cdot 60 = 40.626 \rightarrow 40.626 \cdot 142 = 5.768.892 \quad (40)$$

En base a lo anterior, la cantidad total requerida de oxígeno es de 83.730.186 litros lo que equivale a 95.452.412 kilos de este.

Finalmente, se puede dar a conocer la cantidad de [kWh] necesarios para alimentar a toda la isla teniendo en consideración el gasto adicional que sería la producción en base a hidrógeno y los recursos naturales necesarios para la producción de lo anteriormente mencionado.

También es válido mencionar que, en términos de potencia, el parque eólico de la isla solo debería producir unos 4.745[kW] o 4,754[MW]. Al comparar esto con los parques eólicos más grandes que están instalados en Chile, se puede observar que lo que se necesita es un gasto mínimo ya que la cantidad de generadores eólicos a utilizar es solo de 12 lo cual lo transforma en un campo de un tamaño bastante pequeño, pero lo suficiente para abastecer



todos los gastos energéticos de la isla, dejando un excedente significativo para los próximos años.

$$4.612.300 \cdot 12 = 55.347.596[\text{kWh}] \quad (41)$$

**Tabla 27: Totalidad de recursos a utilizar y producidos.**

Recursos	Cantidad
Energía eléctrica necesaria (parcial)	3.069.268[kWh]
Energía eléctrica necesaria (total)	41.351.889[kWh]
Potencia necesaria (parcial)	350[kW] o 0,350 [MW]
Potencia necesaria (general)	4.745[kW] o 4,754 [MW]
Energía eléctrica que se puede generar	55.347.596[kWh]
Potencia que se puede generar	6.318[kW] o 6,31[MW]
Cantidad de hidrógeno a producir(parcial)	56.868[kg]
Cantidad de hidrógeno a producir(total)	824.387 [kg]
Agua(parcial)	454.944 – 682.416[L]
Agua(total)	6.603.096 – 9.904.644[L]
Cantidad de oxígeno total	95.452.412[kg]

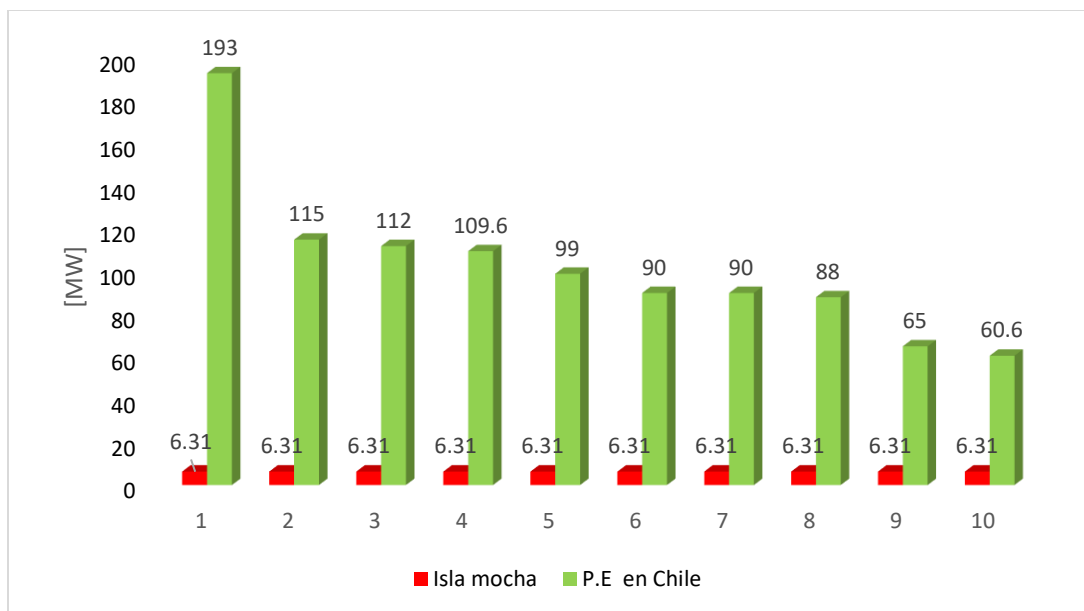
Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de la tabla 27, se puede calcular el excedente de energía que se produciría con el proyecto, lo que se calcula de la siguiente manera:

$$55.347.596 - 41.351.889 = 13.995.707[\text{kWh}] \quad (42)$$

Por lo que se puede observar en la tabla 27, en términos de energía que se puede generar y la que se necesita utilizar, habría un excedente bastante grande, lo que deja un buen sustento en caso de que el gasto energético de la isla pudiera aumentar con el tiempo.

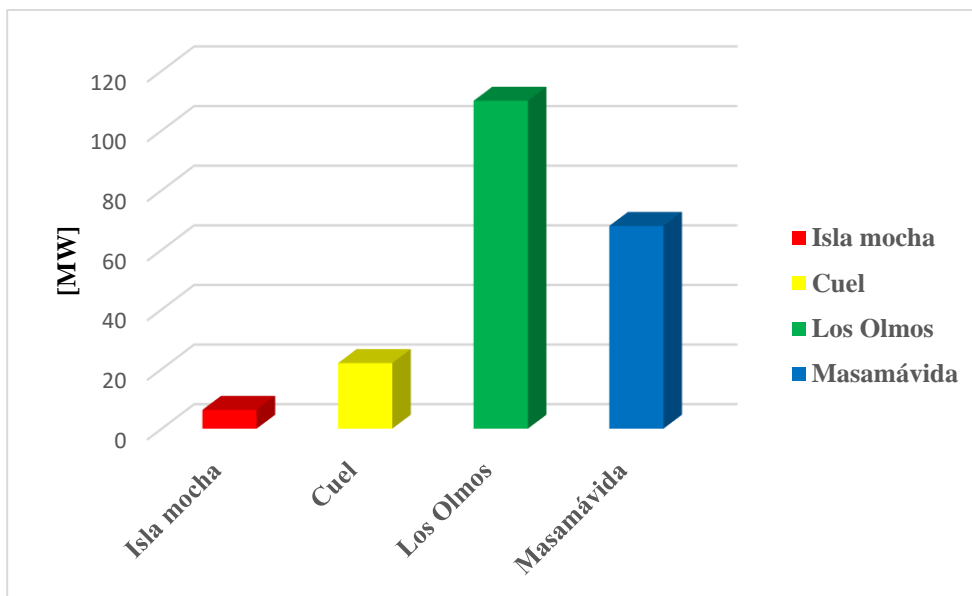
En la figura 45, se presenta una comparación de los 10 parques eólicos más grandes de Chile y el que se debería poner en Isla Mocha.



**Figura 45 Comparación de parques eólicos en Chile vs parque eólico Isla Mocha.**

Fuente: Elaboración propia.

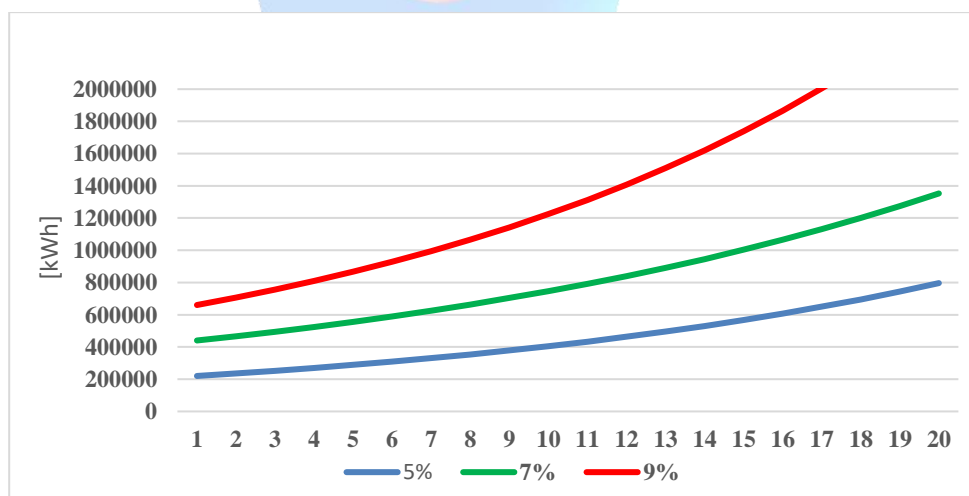
También se realizó la comparación con el parque eólico Cuel que se encuentra en Los Ángeles, Región del Bio-Bio. Cabe mencionar que este parque es considerado uno de los parques de tamaño medio, ya que posee una capacidad instalada para producir 33[MW] y está compuesto por solo 23 aerogeneradores. Adicionalmente se agregaron parques que están en construcción en la región como el Masamávida 68[MW] y Los Olmos con una potencia de 110[MW], para tener un mayor espectro de comparación [30]. Lo anterior se muestra en la figura 46.



**Figura 46 Comparación de parques eólicos en la región**

Fuente: Elaboración propia.

Lo desarrollado teóricamente en este trabajo de título hasta el momento, muestra que su funcionamiento sería viable, por lo tanto, a partir de estos datos se hará una proyección a 18 años considerando que el consumo energético de la isla registra un crecimiento del 5%, del 7 % y del 9%, el que se muestra gráficamente en la figura 47.



**Figura 47 Proyección de consumo energético**

Fuente: Elaboración propia.

Y si se toma en consideración el consumo energético de producción de hidrógeno esta gráfica varía de una manera bastante exponencial, quedando de acuerdo como lo muestra la figura 48.

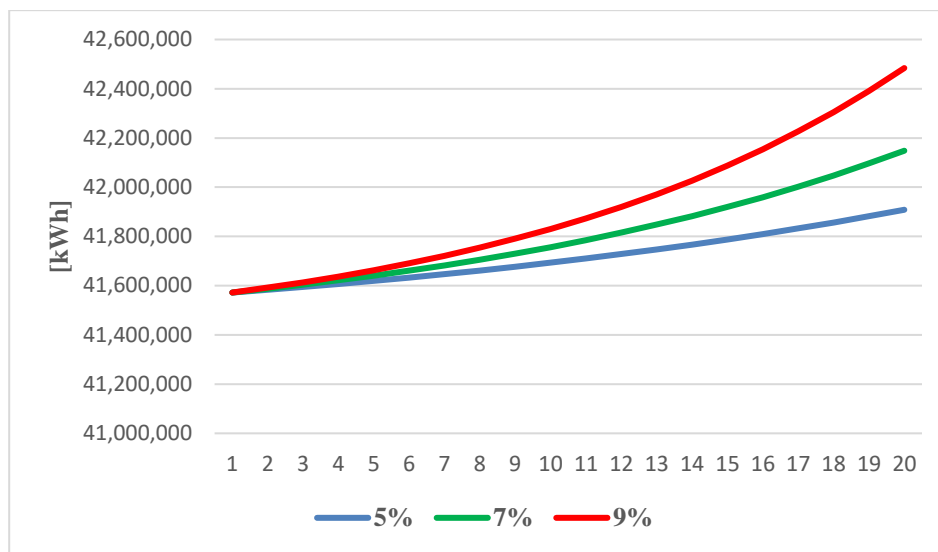


Figura 48 Consumo energético con producción de H2V

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica de la figura 49, muestra la relación de estos dos últimos parámetros.

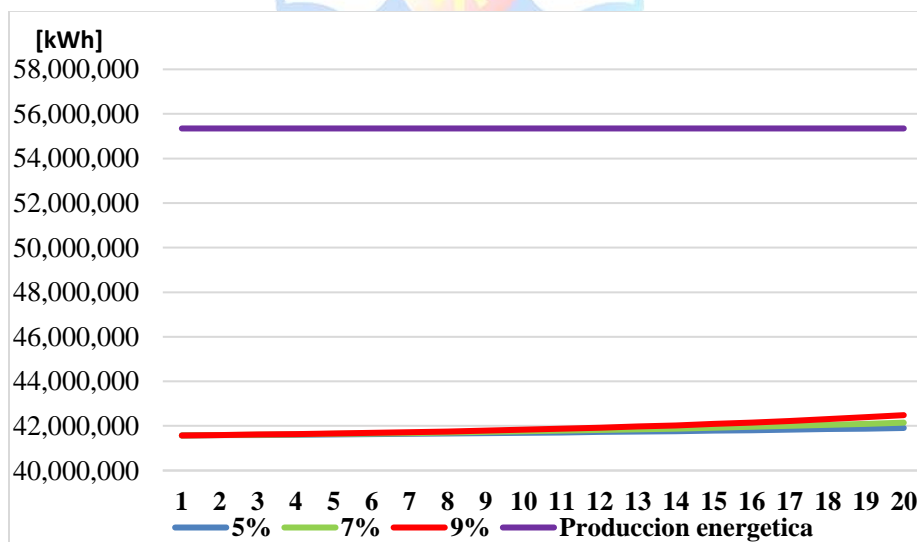


Figura 49 Consumo energético vs producción energética

Fuente: Elaboración propia.

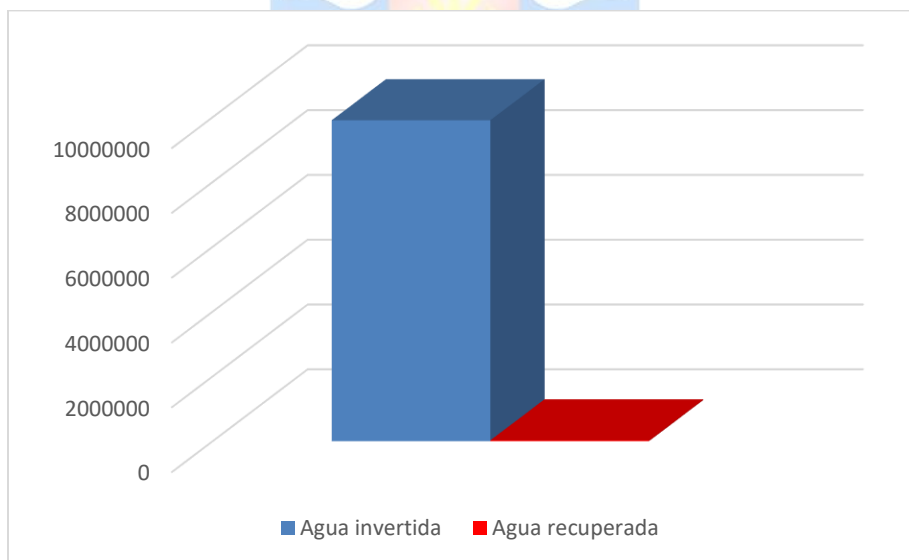
En temas de recursos hídricos también hay que tener datos en consideración, por ejemplo, según el fabricante de las celdas de combustible, estas producen 0,5 litros de agua por [kWh] producido, por lo que la inversión de agua que se enuncia en la tabla 27 se ve reducida en consideración, ya que se recupera una parte de dicha inversión en el mismo proceso de producción. Ahora bien, sabiendo que las celdas o pilas deben producir un total de 51.525[kWh], se puede calcular la cantidad de agua que se recupera:

$$51.252 \cdot 0,5 = 25.762,5 \approx 25.763[L] \tag{43}$$

Con esto en conocimiento, se puede calcular el porcentaje de agua que se recupera en el proceso:

$$\begin{aligned} 9.904.644 &\rightarrow 100\% \\ 25.763 &\rightarrow x\% \\ x &\rightarrow 0,26\% \end{aligned} \tag{44}$$

Se debe considerar que se recupera un 0,26% del agua producida en forma líquida, también hay residuos en forma gaseosa, pero estos son más complicados de calcular y volver a utilizar. La figura 50, muestra lo anteriormente expuesto.



**Figura 50 Agua invertida vs agua recuperada**

Fuente: Elaboración propia.

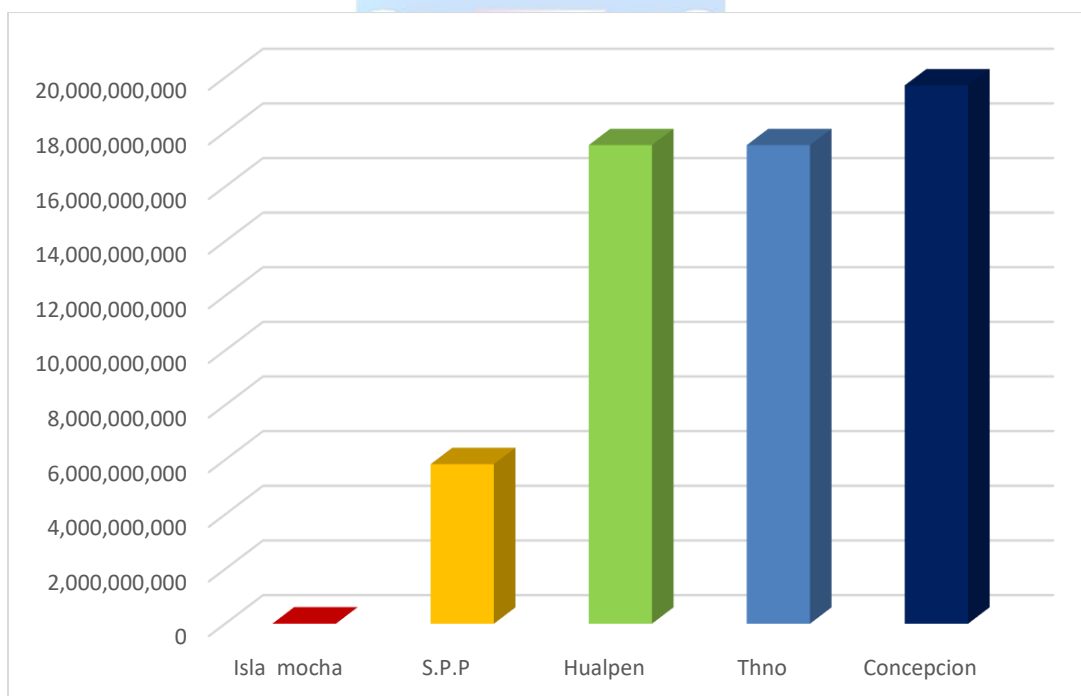
Para comparar los datos y analizar objetivamente el gasto de agua, se procede a enunciar las cantidades de litros de agua utilizados en algunas ciudades de la región por día y anual (tabla 28), con esto se puede lograr a comparar lo que usa la isla.

**Tabla 28: Cantidad de agua utilizada en la región por comuna**

Ciudad	Cantidad de litros de agua diario	Cantidad de litros de agua anual
Concepción	51 millones	19.710 millones
Talcahuano	48 millones	17.520 millones
Hualpén	48 millones	17.520 millones
San Pedro de la Paz	16 millones	5.840 millones

Fuente:[31], [32].

De la gráfica de la figura 51, se aprecia claramente la diferencia en las cantidades de agua anual, para notar lo diminuta que sería la inversión en comparación con la utilización de agua en grandes ciudades de la región.



**Figura 51 Comparativa de utilización de agua**

Fuente: Elaboración propia.

### 7.3 Conclusión

Como ya se explicó anteriormente, para producir la energía parcial que necesitaría la isla solo bastaría con un aerogenerador, pero en consideración a que se calculó un campo eólico de 12 generadores eólicos, se puede producir una cantidad de energía que supera con bastante facilidad la que se requiere en un año, agregando a esta buena producción, que el parque eólico sería de un tamaño bastante diminuto, ya que el parque de la ciudad de los ángeles consta de 22 aerogeneradores y este pasara a ser el más pequeño en la región y prácticamente cuenta con el doble de los generadores eólicos que se necesitarían poner en la isla.

Por otra parte, en el área de las pilas de combustible aún se requieren solo 3, ya que estas deben estar funcionales solo para cuando no puedan funcionar los aerogeneradores y, en este momento, ya se debe tener la cantidad de hidrógeno necesaria producida, lo que vuelve 0 el gasto energético de producción.

En temas de electrolizadores no es necesaria una cantidad tan amplia como la de los generadores eólicos, pero si al poseer 2 o 3 se puede realizar la producción y posterior almacenamiento de una manera más rápida y expedita.

Por su parte el recurso hídrico es el principal problema de estos proyectos, ya que la recuperación de esta agua es bastante baja, se invierte una cantidad elevada y como se puede observar en la figura 50 no se recupera ni el 1% de la inversión. De igual forma es importante mencionar que esta cantidad de litros de agua que se consumen durante el año para la producción de hidrógeno es diminuta, ya que por ejemplo Concepción tiene un consumo diario de 51 millones de litros [32].

Finalmente, si hablamos de la eficiencia del proyecto, se tiene que la del electrolizador rodea el 70%, mientras que la de la pila es de un 60%, por consecuencia se obtiene una eficiencia total del proceso (producción eléctrica con hidrógeno) igual a:

$$0,70 \cdot 0,60 = 0,42 \rightarrow 42\% \quad [33] \quad (45)$$

## 8 COSTOS

### 8.1 Introducción

A causa de que no recibir respuestas de los proveedores de los productos que se seleccionaron, se revisan valores aproximados para la implementación del proyecto, en base a presupuestos obtenidos por internet y otros datos aproximados.

Dentro de estos presupuestos deben venir incluidos los valores de compras y los de instalación de los elementos a utilizar como, por ejemplo: generadores eólicos, electrolizadores, pilas de combustible, estanques, etc.

### 8.2 Desarrollo

En este punto se hará un desglose de los costos del proyecto.

#### 8.2.1 Aerogeneradores

Como ya se dio a conocer en el punto 7.2.1, el modelo de aerogenerador a utilizar es el General Electric GE 1.5s. Es válido mencionar que cualquier aerogenerador de 100 metros de altura de torre y de 1,5[MW] tendrá una producción similar.

Luego de esto, para estimar el costo de los aerogeneradores, se utilizó un estudio de análisis de LCOE desarrollado por la financiera Lazard [34].

En dicho documento se estima un intervalo de valores en dólares por [kW] producido, este intervalo es 1.100-1.500 [USD/kW]. Por temas de tecnologías se utilizará el intervalo más grande.

Tomando en consideración lo anterior, se procede a calcular el costo de cada aerogenerador:

$$1.500 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{kW}} \right] \cdot 1.500[\text{kW}] \rightarrow \$2.250.000\text{USD} \cdot 12 = 27.000.000\text{USD} \quad (46)$$

Finalmente, el costo aproximado es de 32,7 millones de dólares (IVA incluido), (se calculó el IVA que tiene un valor del 19%, por lo cual a los 27 millones se les saco el 19% y luego se les sumo).



También es necesario incluir dentro de los costos, infraestructura y equipamientos anexos que son necesarias en la instalación de los parques eólicos, como una estación meteorológica y las obras civiles, dentro de estas se engloban:

- Caminos interiores.
- Plataformas de montaje.
- Fundación de aerogeneradores.
- Estación meteorológica.

En los presupuestos revisados de proyectos anteriores, a estas instalaciones se les otorga un valor que va entre el 15-20% del total de los aerogeneradores [24].

Con base en lo anterior se obtuvo aproximadamente un costo de:

$$32.700.000 \cdot 0,20 \rightarrow 6.534.000\text{USD} \quad (47)$$

### 8.2.2 Electrolizador

Como ya se dejó en evidencia en el punto 7.2.2, el modelo de electrolizadores que se utilizarán en el proyecto serán los Technical overview HyProvide X-Series de la empresa Green Hydrogen Systems [23].

Estos electrolizadores se seleccionaron en base a sus características, las cual especifican que están diseñados para trabajos con energías renovables y potencias superiores a 6[MW] llegando como máximo a 100[MW].

Para conocer la cantidad específica de electrolizadores es necesario recopilar datos de puntos anteriores. Como:

- Cantidad de hidrógeno producida por hora: 107[kg/h].
- Cantidad de hidrógeno requerida por la isla: 824.387[kg].
- Tiempo que se tiene para producir: 8 meses/ 5.760horas.

Conociendo esto ya se puede calcular la cantidad de electrolizadores necesarios:

$$\frac{824.387\text{kg}}{107 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 7.704\text{h} \quad (48)$$

Para producir la cantidad de hidrógeno con uno solo electrolizador se requiere 7.704 horas, que es más de la cantidad de horas que se tienen destinadas a la producción. Por lo que será necesario tener dos electrolizadores:

$$\frac{824.387\text{kg}}{2 \cdot 107 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 3.852\text{h} \quad (49)$$

Al tener dos electrolizadores se puede producir el hidrógeno necesario en solo 6 meses, por lo que solo queda almacenarlo.

También es necesario saber que en estudios comisionados por CORFO sobre financiamiento de proyectos de H2V en Chile se define como costo actual de electrolizadores en 900 USD/kW, independiente del fabricante [35].

$$900 \cdot 4,7[\text{MW}] = 4.230.000 \quad (50)$$

Lo que deja como gastos por la planta de electrolisis un total de aproximadamente 5,1 millones de dólares (se incluyó el IVA).

### 8.2.3 Planta de almacenamiento

Los costos de este punto fueron recopilados de distintas fuentes. Los valores son los siguientes:

Primero los compresores de hidrógeno, cada uno tiene el valor aproximado de 850.950 dólares (IVA incluido) [36], es necesario calcular la cantidad de estos que se utilizaran.

El compresor puede entregar 291.883[kg] de hidrógeno durante el año, lo que da un caudal de 33,32[kg/h], también sabiendo que la isla requiere 824.387[kg] durante el año, es un cálculo simple:

$$\frac{824.387}{291.883} = 2,89 \quad (51)$$

Por lo que se requieren solo 3, pero se debe tener en consideración que en el cálculo se tomó producción de hidrógeno todo el año, situación que no podrá ocurrir, ya que cuando los aerogeneradores no puedan funcionar, el hidrógeno ya debe estar utilizable.

Por lo que es necesario calcularlo de otra manera:

Primero se utilizan  $33,32 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot 24[\text{h}] = 799,68[\text{kg}]$  kilogramos, ahora es necesario obtener la cantidad en 9 meses, los que equivalen a 273,75 días.

$$33,32 \cdot 24 = 799,68 \cdot 273,75 = 218.912[\text{kg}] \quad (52)$$

Con lo anterior ahora se puede volver a realizar el cálculo de la ecuación 51

$$\frac{824.387}{218.912} = 3,77 \quad (53)$$

Con lo anterior se puede observar que se requieren 4 compresores, para producir la cantidad de hidrógeno necesaria durante los meses previos a cuando los aerogeneradores no pueden funcionar.

El costo final de los compresores sería aproximadamente a 3,4 millones de dólares (IVA incluido).

Por otra parte, para poder comprimir el oxígeno solo se requiere un compresor, ya que este tiene una capacidad de caudal casi 10 veces mayor que el del hidrógeno. Por otro lado, se requiere una mayor cantidad de estanques para guardar la producción de oxígeno al ser más denso.

Los costos del compresor de oxígeno van en torno a los 24.500 dólares (IVA incluido) [37], mientras que los tanques de almacenamiento van en torno a los 863.918 dólares (IVA incluido).

Lo que deja como gasto aproximado 6,2 millones de dólares.

Para almacenar el hidrógeno sería necesario tener 3 estanques de los ya mencionados aproximadamente, esto en base a que hay periodos en los que se estará produciendo y utilizando casi simultáneamente, por lo tanto, no se guardara la totalidad instantáneamente.

Estos estanques poseen un valor aproximado de 10,7 millones de dólares. Por lo que el total queda un valor en torno a los 32,2 millones de dólares [37].

#### **8.2.4 Pila de combustible**

Para la pila de combustible ya se calculó la cantidad necesaria para poder cubrir de buena manera la demanda energética de la isla. Es por lo que solo se pasa al detalle de valores.

Según páginas de venta como Aliexpress, pilas similares tiene valores equivalentes a ente 50.000 dólares si le agregamos el IVA alcanzan valores algo así como los 67.000 dólares:

$$67.000 \cdot 3 = 201.000USD \quad (54)$$

En base a esto se obtiene el costo aproximado de 205.000 dólares.

#### **8.2.5 Alimentación de agua para electrolizadores**

Para alimentar los electrolizadores de agua se puede utilizar tanto la conexión de agua de la isla, como napas subterráneas, si fuera necesario utilizar estas últimas se utilizarían bombas de extracción y tuberías, las cuales se obtuvieron de la página de la empresa Absolute Pumps. Por otro lado, se agregaron 4[km] de tubería de polietileno de alta densidad para transportar el agua si es necesaria sacarla desde las napas subterráneas [35].

El valor aproximado de la bomba de extracción es de 1.400USD, mientras que el valor de la tubería es de 3.500 USD, lo que deja un total de 4.900USD para el sistema de alimentación de agua.

#### **8.2.6 Otros gastos de inversión**

Instalación y obras civiles consume el 50% del presupuesto, ya que incluye la mano de obra para la construcción, la instalación de equipos, las obras civiles requeridas y envío de los equipos principales [37].

Tiene un valor aproximado de 42.437.000 millones de dólares.

La declaración de impacto ambiental la realizan usualmente empresas consultoras externas y se debe hacer en el caso de este proyecto y se estima que su costo es de 187.500USD [38].

Por otro lado, ante variaciones del dólar o cualquier problema con la moneda local con la que se esté trabajando se agrega un 2% del presupuesto total para estos márgenes.

### 8.3 Conclusión

En base a todos los valores que se presentaron en el punto 8.2 se puede obtener la siguiente tabla que deja como resultado final el costo aproximado del proyecto.

**Tabla 29: Aproximación total de costos.**

Producto	Valor (USD)
Aerogeneradores	39.200.000
Electrolizadores	4.230.000
Compresor(es) de hidrógeno	3.400.000
Compresor(es) de Oxígeno	24.500
Tanques de almacenamiento	38.400.000
Pilas de combustible	205.000
Alimentación de agua	4.900
Otros gastos de inversión	42.437.000
Total	128.937.500
2% márgenes de variaciones	2.578.750
Total Final	131.516.250

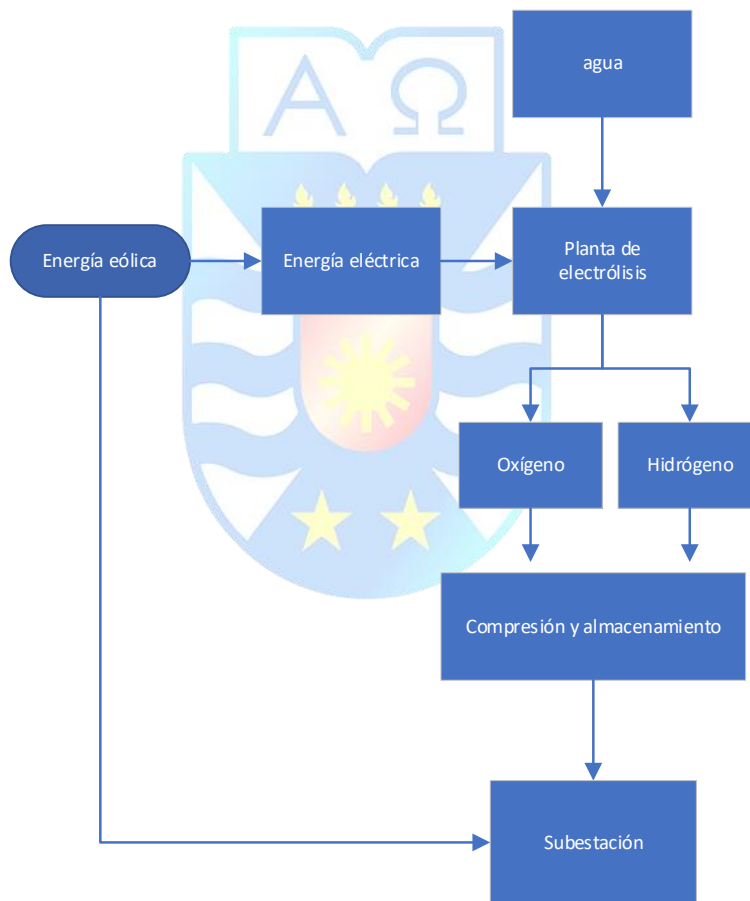
Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que estos costos son dejando fuera la conexión a la red de la isla, ya que este gasto debería correr por parte de la empresa que esté encargada de distribuir el servicio, en estos gastos se incluye el transformador, rectificador, entre otras cosas.

De igual manera este presupuesto no incluye los costos de envío, ya que cada empresa transportista posee sus propios costos, por temas de distancia del viaje y peso del paquete por consecuencia estos factores los puede informar con mayor claridad el vendedor del producto, los cuales no fueron muy amables en la entrega de información.

## 9 CONCLUSIONES GENERALES

Al concluir este proyecto se puede observar que se cumple con el objetivo de modelar técnica y económicamente la generación eléctrica basada en H<sub>2</sub>V proveniente de una estación eólica. Esto se logra diseñando 4 estaciones, la estación eólica, la que posee 12 aerogeneradores de 1,5[MW], la planta de electrolisis que posee 2 electrolizadores, la planta de almacenamiento, en esta se debe comprimir y almacenar los productos para su futura utilización y la planta productora que se sustenta en la utilización de pilas de combustible. Se dice que se cumple el objetivo ya que la estación de electrolisis posee un factor de planta del 70%, por lo que la producción se llevara a cabo de manera muy aceptable.



**Figura 52 Diagrama de modelo de la planta.**

Fuente: [37].

También se realizó una aproximación de costos y comparado a otros proyectos similares como el que se muestra en la referencia [37] el costo económico es bastante menor, pero de todas maneras es un costo bastante elevado, por lo que se podría buscar soluciones más accesibles a corto plazo como, por ejemplo, en España que tiene una cultura eólica más antigua que Chile, los aerogeneradores se actualizan en las grandes ciudades, pero en vez de desechar los aerogeneradores que son reemplazados, estos se utilizan en lugares más rurales, ya que a su vida útil aún les quedan años [39].

En base a esto se podrían comprar aerogeneradores desechados por los grandes países europeos y reutilizarlos en la isla, junto con estos utilizar los generadores a diésel que aún posee la isla. De esta manera los costos disminuirían de una forma abismal, ya que los aerogeneradores reutilizados rondan un valor de 50-60 mil dólares. El problema de esto es que sería una solución parche ya que de igual forma se produciría energía en base a combustibles fósiles, el lado positivo de esta solución es que la contaminación producida se disminuye. El proceso anteriormente mencionado se podría tomar como un paso previo a la realización del proyecto presentado en este documento.

Por otro lado, en temas de energía como ya se mencionó en el punto 8, los costos de conexión a la red no se tomaron en consideración ya que estos deberían ser sustentados por la empresa distribuidora, tampoco se incluyó nada referente al almacenamiento de energía en el campo eólico, esto debido que los costos de almacenamiento también deberían ser sustentados por la red de distribución. De todas formas, en trabajos futuros se podría abordar el tema de almacenamiento y este como afectaría el número de aerogeneradores necesarios [37].

También es válido mencionar que en base a los resultados que se pueden observar en este proyecto, el plan de Chile de ser un gran productor de H<sub>2</sub>V a nivel mundial es muy factible, ya que existe una gran cantidad de países que se dedican simplemente a importar este producto, entre ellos Japón país que ansía tener independencia energética [37]. Y como se observó Chile tiene unas condiciones óptimas para la producción en base a energía eólica y otras energías renovables.

## **10 TRABAJOS FUTUROS**

### **10.1 Introducción**

Una vez desarrollado el trabajo de título, se puede ver un poco más allá de lo analizado y aplicar distintas mejoras al sistema ya sea por necesidad o por avances en la tecnología aplicada.

Dentro de esta sección se verán algunos trabajos que se podrían aplicar.

### **10.2 Desarrollo**

#### **10.2.1 Reutilización de los residuos.**

La celda de combustible escogida previamente para el proyecto tiene leves niveles de residuos como lo es la producción de agua (que son 0,5 [l/kWh<sub>e</sub>] aprox.). Es por ello que, como futuro proyecto, se plantea la reutilización de esta agua, ya sea en su estado líquido o condensar el vapor de agua que emite, con el fin de poder reingresarla al ciclo de la electrolisis.

#### **10.2.2 Utilización del agua de mar.**

Si hay algo que abunda en el planeta tierra es el agua de mar y la utilización de ella para el proceso de electrolisis tiene un inconveniente y es que el agua necesaria para el ciclo debe de ser agua pura. Por esto, una opción bastante viable sería la de poder desalinizar el agua salada, pero no sería suficiente ya que puede quedar con minerales aún por lo que habrá que purificar y filtrar antes de introducirla al electrolizador.

#### **10.2.3 Ampliación del parque eólico.**

Como la sociedad está en constante crecimiento, el incremento de población de la isla es muy probable lo que conlleva un mayor consumo de energía. Es por ello por lo que ampliar el parque eólico, instalando más aerogeneradores, puede que llegar a ser una necesidad para mantener en pie el proyecto a futuro.

#### **10.2.4 Producir para vender.**

Una vez logrado la estabilidad energética en la isla, se podría pensar en llegar a ser un exportador de hidrógeno en Chile. El cómo llegar a serlo vendría de la mano de ampliar



el parque eólico en caso de necesitarlo y con la compra de otro electrolizador para poder generar más de lo que se calculó en el proyecto.

### 10.3 Conclusión

Se da a conocer distintos proyectos que podrían ser complementarios al ya planteado anteriormente ya sea por avances en tecnologías o por necesidad. Agregar que estas aplicaciones podrían ser aplicadas en un mediano o largo plazo.

## 11 ANEXO

Dentro de los anexos se adjuntan páginas o cotizaciones en las cuales se encontraron los precios aproximados utilizados en este trabajo de título.

### 11.1.1 Aerogeneradores

- Nuevo

Por otra parte, los nuevos se aproximaron por cómo se especificó anteriormente ante la negativa del vendedor de contestar correos sobre cotización.

- Reutilizado

Como se dijo en la conclusión, se pueden reutilizar los aerogeneradores más viejos con vida útil aún, se adjunta la siguiente página:

[https://en.wind-turbine.com/wind-turbines/102174/1-5s-used-to-sell-wind-turbines.html?utm\\_source=wind-turbine-models&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=offers](https://en.wind-turbine.com/wind-turbines/102174/1-5s-used-to-sell-wind-turbines.html?utm_source=wind-turbine-models&utm_medium=cpc&utm_campaign=offers)

### 11.1.2 Electrolizadores

En este punto se formó un conflicto, ya que los vendedores de los modelos seleccionados no fueron muy amables en ámbitos de dar cotizaciones a estudiantes, por lo cual se utilizó un valor similar al de la referencia [35].

- Página del seleccionado:

[www.greenhydrogensystems.com/#electrolysers](http://www.greenhydrogensystems.com/#electrolysers)

- Página de la referencia:

[www.new.siemens.com/mx/es/productos/energia/energia-renovable/soluciones-hidrogeno.html](http://www.new.siemens.com/mx/es/productos/energia/energia-renovable/soluciones-hidrogeno.html)

### 11.1.3 Pilas de combustible

Las pilas de combustible se cotizaron con ayuda del profesor Rodrigo Diaz, pero en base a sus datos y con la descripción de la pila se obtuvo un valor aproximado o referencial.

- Página de la celda seleccionada:

[www.nedstack.com/en/pem-fcs-stack-technology/fcs-13-xxl](http://www.nedstack.com/en/pem-fcs-stack-technology/fcs-13-xxl)

- Pagina referencial:

[https://es.aliexpress.com/item/1005004007286762.html?spm=a2g0o.detail.1000014.2.7caffbddaVw87g&gps-id=pcDetailBottomMoreOtherSeller&scm=1007.40000.267768.0&scm\\_id=1007.40000.267768.0&scm-url=1007.40000.267768.0&pvid=3162683a-31f9-4567-8cc9-cb73584d6709&\\_t=gps-id:pcDetailBottomMoreOtherSeller,scm-url:1007.40000.267768.0,pvid:3162683a-31f9-4567-8cc9-cb73584d6709,tpp\\_buckets:668%232846%238115%23828&pdp\\_ext\\_f=%7B%22sku\\_id%22%3A%2212000027720211312%22%2C%22sceneId%22%3A%2230050%22%7D&pdp\\_npi=2%40dis%21CLP%213.8953051E7%213.6615866E7%21%21%21%21%21%21%402101d1ac16609642708256340e699f%2112000027720211312%21rec](https://es.aliexpress.com/item/1005004007286762.html?spm=a2g0o.detail.1000014.2.7caffbddaVw87g&gps-id=pcDetailBottomMoreOtherSeller&scm=1007.40000.267768.0&scm_id=1007.40000.267768.0&scm-url=1007.40000.267768.0&pvid=3162683a-31f9-4567-8cc9-cb73584d6709&_t=gps-id:pcDetailBottomMoreOtherSeller,scm-url:1007.40000.267768.0,pvid:3162683a-31f9-4567-8cc9-cb73584d6709,tpp_buckets:668%232846%238115%23828&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000027720211312%22%2C%22sceneId%22%3A%2230050%22%7D&pdp_npi=2%40dis%21CLP%213.8953051E7%213.6615866E7%21%21%21%21%21%21%402101d1ac16609642708256340e699f%2112000027720211312%21rec)

### 11.1.4 Estanques

Los estanques se aproximaron en base a los datos que se utilizan en la referencia número 35.

### 11.1.5 Compresor

En el compresor fue más fácil, ya que los valores se encontraban en la página del fabricante o vendedor en este caso:

[www.toplongcompressor.en.made-in-china.com/product/HXYxqCMDCPWg/China-Oil-Free-Oxygen-Compressor-Nitrogen-Compressor-Argon-Compressor-Helium-Compressor-Gow-10-2-150-.html](http://www.toplongcompressor.en.made-in-china.com/product/HXYxqCMDCPWg/China-Oil-Free-Oxygen-Compressor-Nitrogen-Compressor-Argon-Compressor-Helium-Compressor-Gow-10-2-150-.html)

### 11.1.6 Bomba extractora

La bomba extractora tal y como se mencionó anteriormente en la página de la empresa que lo vende se podía encontrar el valor, se adjunta la página a continuación:

[W^3.absolutewaterpumps.com/accessories/pacer-pump-parts/page/7?product\\_list\\_dir=desc](http://W^3.absolutewaterpumps.com/accessories/pacer-pump-parts/page/7?product_list_dir=desc)

### 11.1.7 Tuberías

Al igual que los dos puntos anteriores, el vendedor en este caso tiene los valores en la página, por lo cual no fue necesario hacer una cotización formal.

[spanish.alibaba.com/p-detail/Sea-60709902493.html?spm=a2700.details.0.0.35e365e5EaNqss](http://spanish.alibaba.com/p-detail/Sea-60709902493.html?spm=a2700.details.0.0.35e365e5EaNqss)



## 12 Referencias

- [1] P. Asensio and © Naturmedi, “Hidrógeno y pila de combustible,” Nov. 2006. [Online]. Available: [www.ariema.com](http://www.ariema.com)
- [2] D. Cordonasu Stanescu and J. Llorca Piqué, “Obtención de hidrógeno verde y aplicación en cámaras de combustión industriales,” Barcelona, Jun. 2021.
- [3] F. Miranda and A. Sotomayor, “Estudio de prefactibilidad de una planta de producción de hidrógeno a partir de energía eólica,” Universidad Austral de Chile, Puerto Montt, 2013.
- [4] V. Yaramasu and B. Wu, “MODEL PREDICTIVE CONTROL OF WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS,” 2017.
- [5] O. Bičáková and P. Straka, “Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 16. pp. 11563–11578, Aug. 2012. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.047.
- [6] Ministerio de Energía, “Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones,” Santiago, Nov. 2020.
- [7] Escuelapedia, “Pila de combustible,” *Pila de combustible*. <https://www.escuelapedia.com/pila-de-combustible/>
- [8] J. Peña *et al.*, “Pilas de combustible,” 2006.
- [9] Windfinder, “Previsiones del viento, del oleaje y del tiempo Isla Mocha,” 2022. [https://es.windfinder.com/forecast/isla\\_mocha](https://es.windfinder.com/forecast/isla_mocha)
- [10] Ministerio de Energía, “Certificado instalación eléctrica Isla Mocha,” Santiago, Dec. 2018. [Online]. Available: [www.sec.cl](http://www.sec.cl)
- [11] Ministerio de Energía, “Sistema Eléctrico Aislado de Isla Mocha,” Mar. 2019.

- [12] J. Medina, "Todo lo que debes saber sobre aerogeneradores," *Todo lo que debes saber sobre aerogeneradores*.  
<https://aprende.com/blog/oficios/energia-eolica/todo-lo-que-debes-saber-sobre-aerogeneradores/>
- [13] I. Aso, "Energía eólica e hidrógeno, una simbiosis anticipada," 2008.
- [14] G. Pico-Saltos, R. Pico-Saltos, and D. Mendoza, "Turbinas hidrocínicas de eje vertical helicoidal," 2018.
- [15] D. Yañez, "VIV resonant wind generators," Jun. 2018. [Online]. Available: [www.vortexbladeless.com](http://www.vortexbladeless.com)
- [16] J. Gimenez and J. Gómez, "Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia," Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2011.
- [17] Vortex Bladeless, "¿Cómo funciona Vortex?"  
<https://vortexbladeless.com/es/desarrollo-tecnologia/>
- [18] Iberdrola, "¿Sabes cómo funcionan los parques eólicos terrestres?"  
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/como-funcionan-parques-eolicos-terrestres>
- [19] Ministerio de Energía, "Explorador Eólico."  
<https://eolico.minenergia.cl/exploracion>
- [20] Energía Abierta, "Capacidad instalada."  
<http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>
- [21] "Modelos de aerogeneradores." <https://es.wind-turbine-models.com>
- [22] Green Hydrogen Systems, "Electrolizadores."  
<https://greenhydrogensystems.com/#electrolysers>
- [23] Green Hydrogen Systems, "Technical Specs A-Series & X-Series," 2022. [Online]. Available: [www.greenhydrogensystems.com](http://www.greenhydrogensystems.com)

- [24] Hiperbaric, “Tecnología de compresión de hidrógeno a altas presiones,” 2022.
- [25] Wenling toplong, “Compresor de oxígeno.” <https://www.toplongcompressors.com/oxygen-compressor.htm>
- [26] Strength Equipments, “Estanque para gases.” <https://www.industrialautoclaves.com/product/autoclave-oven/>
- [27] Nedstack, “Celda de combustible.” <https://nedstack.com/en/pem-fcs-stack-technology/fcs-13-xxl>
- [28] Nedstack, “Nedstack FCS 13-XXL,” Jul. 2022.
- [29] Serviaire, “¿Qué es, o qué significa NL/MIN?” <https://www.serviaire.com/que-es-nl-min/>
- [30] Generadoras de Chile, “Capacidad instalada en diferentes ubicaciones a lo largo de Chile.” <http://generadoras.cl/empresas-asociadas/aes-chile>
- [31] Ministerio de Obras Públicas, “Mesa Nacional del Agua-Primer Informe,” 2020.
- [32] FCH, “Radiografía del Agua,” 2020.
- [33] D. Nuevo, “La pila de combustible,” Jan. 25, 2022. <https://www.tecpa.es/pila-combustible/#:~:text=La%20eficiencia%20energética%20de%20la,varia%20del%2030%20al%2035%25>
- [34] Lazard, “Lazard’s levelized cost of energy analysis-version 13.0,” 2019.
- [35] Comité sola e innovación energética and CORFO, ““Estudio para definir esquemas de financiamiento para acelerar la adopción tecnológica e implementación de proyectos de generación, almacenamiento, transporte, consumo y exportación de Hidrógeno Verde en Chile,” 2020.
- [36] “Compresor.” [www.toplongcompressor.en.made-in-china.com/product/HXYxqCMDPCWg/China-Oil-Free-](http://www.toplongcompressor.en.made-in-china.com/product/HXYxqCMDPCWg/China-Oil-Free-)

Oxygen-Compressor-Nitrogen-Compressor-Argon-Compressor-Helium-Compressor-Gow-10-2-150- .html

- [37] R. Araneda, R. Gonzalez, M. Zamora, and B. Herrmann, “Estudio técnico y económico de una planta de producción de hidrógeno verde para exportación a países industrializados,” Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2022.
- [38] R. González, “Estudios de Impacto Ambiental en la mira: Informe encargado por el gobierno revela que ‘no cumplen con requisitos mínimos de confiabilidad,’” Sep. 22, 2012.  
<http://www.lasegunda.com/Noticias/Impreso/2012/09/782680/estudios-de-impacto-ambiental-en-la-mira-informe-encargado-por-el-gobierno-revela-que-no-cumplen-con-requisitos-minimos-de-confiabilidad>
- [39] R. Carreño-Morales, A. Comesaña-Campos, J. Bouza-Rodríguez, and L. González-Piñeiro, “Viabilidad de la reutilización de aerogeneradores en el noroeste español,” Galicia, Sep. 2015. [Online]. Available: <http://alarcos.inf-cr.uclm.es/per/fruiz/pobesp/territorios.htm#aut>

