



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL PROYECTO EÓLICO MINAS DE  
HUASCACHACA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE”

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Ambiental

**AUTOR:** LUIS FERNANDO VALDIVIESO ZALAMEA

**TUTOR:** ING. EDGAR ANTONIO BARRAGÁN ESCANDÓN, Ph.D.

Cuenca - Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Luis Fernando Valdivieso Zalamea con documento de identificación N° 0106412828, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 13 de enero del 2023

Atentamente,



---

Luis Fernando Valdivieso Zalamea

0106412828

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Luis Fernando Valdivieso Zalamea con documento de identificación N° 0106412828, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Trabajo experimental: “Evaluación del potencial del proyecto eólico Minas de Huascachaca para la producción de hidrógeno verde”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 13 de enero del 2023

Atentamente,



---

Luis Fernando Valdivieso Zalamea

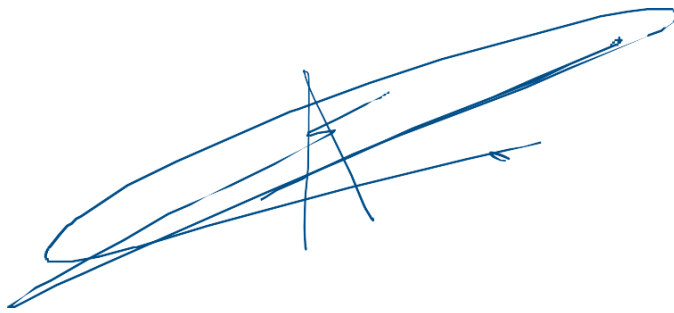
0106412828

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edgar Antonio Barragán Escandón con documento de identificación N° 0102516457, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL PROYECTO EÓLICO MINAS DE HUASCACHACA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE, realizado por Luis Fernando Valdivieso Zalamea con documento de identificación N° 0106412828, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 13 de enero del 2023

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above a horizontal line.

Ing. Edgar Antonio Barragán Escandón, Ph.D.

0102516457

## **RESUMEN**

En este trabajo se investiga la producción de hidrógeno mediante energía eólica, utilizando un electrolizador PEM (membrana de intercambio de protones). Empleando la información del parque eólico Minas de Huascachaca proporcionada por ELECAUSTRO. Aplicando los métodos probabilísticos y cronológico. En el método probabilístico se usó de la distribución de probabilidad Beta para cálculos correspondientes y el modelamiento de las curvas, haciendo una comparación con la distribución de probabilidad de Weibull. A través de la herramienta CrystalBall se examinó las distribuciones con los datos reales del proyecto con el fin de aplicar la función de densidad de probabilidad que más se ajusta. Se utilizó el método cronológico por ser más preciso realizando los cálculos para determinar la energía generada en el transcurso de un año. Estimando la producción de hidrógeno de 2 009,46 toneladas del proyecto eólico para el uso en 299 919 vehículos de celda combustible que funcionan con este gas.

**Palabras clave:** electrolizador, PEM, celda combustible, hidrógeno.

## **ABSTRACT**

In this work the production of hydrogen by means of wind energy is investigated, using a PEM (proton exchange membrane) electrolyser. Using the information from the Minas de Huascachaca wind farm provided by ELECAUSTRO. Applying the probabilistic and chronological methods. In the probabilistic methods, the Beta probability distribution was used for the corresponding calculations and the modeling of the curves, making a comparison with the Weibull probability distribution. Through the CrystalBall tool, the distributions with the real data of the project were examined in order to apply the probability density function that best fits. The chronological method was used because it is more precise when performing the calculations to determine the energy generated in the course of a year. Estimating the hydrogen production of 2 009.46 tons of the wind project for use in 299 919 fuel cell vehicles that run on this gas.

**Keywords:** electrolyser, PEM, fuel cell, hydrogen.

<b>ÍNDICE</b>	
RESUMEN .....	5
ABSTRACT .....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	8
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
OBJETIVOS.....	13
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	13
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	13
<b>1. CAPÍTULO I: MARCO REFERENCIAL</b> .....	14
<b>1.1. Aprovechamiento de la energía eólica</b> .....	14
<b>1.2. Producción de hidrógeno</b> .....	14
<b>1.3. Producción de hidrógeno mediante electrolisis usando energía eólica</b> .....	15
<b>1.4. Electrolizador alcalino</b> .....	16
<b>1.5. Electrolizador de membrana de intercambio de protones</b> .....	17
<b>1.6. Sistemas basados en celdas de combustible</b> .....	18
<b>1.7. Tipos de almacenamiento</b> .....	18
<b>1.8. Vehículos eléctricos con celdas de combustible</b> .....	19
<b>2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA</b> .....	21
<b>2.1. Ubicación del proyecto eólico</b> .....	22
<b>2.2. Obtención de datos</b> .....	23
<b>2.3. Ficha técnica de los aerogeneradores</b> .....	23
<b>2.4. Curva de potencia</b> .....	23
<b>2.5. Rugosidad del terreno</b> .....	24
<b>2.6. Modelamiento de la curva de distribución del viento</b> .....	26
<b>2.6.1. Distribución de probabilidad de Weibull</b> .....	26
<b>2.6.2. Distribución de probabilidad Beta</b> .....	26
<b>2.6.3. Función Beta</b> .....	27
<b>2.6.4. Determinación de la potencia media acumulada de salida</b> .....	28
<b>2.6.5. Cálculo de la energía anual</b> .....	29
<b>2.7. Elección de la distribución</b> .....	29
<b>2.8. Método cinológico del histograma y curvade potencia</b> .....	31
<b>2.9. Producción de hidrógeno</b> .....	31
<b>2.9.1. Electrolizador para transformar energía en hidrógeno</b> .....	31

<b>3. CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	34
<b>3.1. Análisis de Resultados</b> .....	34
<b>3.1.1. Distribución de probabilidad de Weibull</b> .....	34
<b>3.1.2. Distribución de probabilidad Beta</b> .....	35
<b>3.1.3. Generación eléctrica</b> .....	36
<b>3.1.3.1. Método probabilístico</b> .....	36
<b>3.1.3.2. Método cronológico</b> .....	37
<b>3.1.4. Producción de hidrógeno</b> .....	38
<b>3.1.5. Abastecimiento a vehículos eléctricos celda combustible de hidrógeno</b> ...	38
<b>3.1.6. Recorrido y autonomía del VECC</b> .....	38
<b>3.2. Discusión</b> .....	39
<b>4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	42
<b>4.1. Conclusiones</b> .....	42
<b>4.2. Recomendaciones</b> .....	42
Bibliografía.....	44
<b>5. ANEXOS</b> .....	53
<b>5.1. Anexo 1</b> .....	53
<b>5.2. Anexo 2</b> .....	54
<b>5.3. Anexo 3</b> .....	55
<b>5.4. Anexo 4</b> .....	57
<b>5.5. Anexo 5</b> .....	58
<b>5.6. Anexo 6</b> .....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 – Características generales aerogenerador (ARC, 2022).</i>	23
<i>Tabla 2 - Clases y longitudes de rugosidades del terreno. (Cochancela &amp; Astudillo , 2012).</i>	25
<i>Tabla 3 - Cálculo de la densidad de probabilidad de Weibull (Autor).</i>	35
<i>Tabla 4 - Calculo de la función de densidad de probabilidad Beta (Autor).</i>	36
<i>Tabla 5 – Método probabilístico (Autor).</i>	37
<i>Tabla 6 – Método cronológico (Autor).</i>	37
<i>Tabla 7 - Selección de datos del año 2017 (Autor).</i>	58
<i>Tabla 8 - Cálculo de las variables para la distribución de probabilidad Weibull (Autor).</i>	59
<i>Tabla 9 - Cálculo de las variables para la distribución de probabilidad Beta (Autor).</i>	60

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 - Esquema de generación de hidrógeno verde (Autor).</i>	16
<i>Ilustración 2 - Diagrama de flujo de metodología (Autor).</i>	21
<i>Ilustración 3 - Ubicación del proyecto eólico Minas de Huascachaca. (Autor)</i>	22
<i>Ilustración 4 - Curva de potencia. (Autor)</i>	24
<i>Ilustración 5 - Comparación de distribución de Weibull (Autor).</i>	30
<i>Ilustración 6 - Comparación de distribución de Beta (Autor).</i>	31
<i>Ilustración 7 - Curva de la distribución de Weibull (Autor).</i>	34
<i>Ilustración 8 - Distribución de distribución beta (Autor).</i>	35
<i>Ilustración 10 - Ficha técnica de aerogeneradores (ARC, 2022).</i>	53
<i>Ilustración 11 - Curva de potencia del aerogenerador <math>C_t</math> y <math>C_p</math>. (ARC, 2022).</i>	54

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1 - Corrección de la velocidad.</i>	25
<i>Ecuación 2 - Distribución de la probabilidad de Weibull en función del viento.</i>	26
<i>Ecuación 3 - Distribución de la probabilidad de Weibull acumulativa.</i>	26
<i>Ecuación 4 - Distribución de probabilidad Beta en función del viento.</i>	27
<i>Ecuación 5 - Función beta con parámetros de forma.</i>	28
<i>Ecuación 6 - Potencia media acumulada de salida.</i>	28
<i>Ecuación 7 - Energía anual.</i>	29
<i>Ecuación 8 - Energía producida</i>	31
<i>Ecuación 9 -Producción de hidrógeno mediante electrolizador.</i>	33
<i>Ecuación 10 – Energía anual método cronológico.</i>	38



## INTRODUCCIÓN

El tema de este trabajo es la EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL PROYECTO EÓLICO MINAS DE HUASCACHACA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE; con la finalidad de disminuir las emisiones contaminantes. Se busca una alternativa ecológica para el transporte en automóviles.

Actualmente, el consumo intensivo de combustibles fósiles ha producido graves consecuencias mundiales, incluidos el cambio climático y la contaminación ambiental (Wang, Sung, & Hsu, 2016). Aproximadamente el 80% de la energía primaria proviene de combustibles fósiles como el petróleo crudo, el gas natural y el carbón. Por otra parte, para la movilidad, ósea para el transporte marítimo, aéreo y terrestre, se utiliza más del 35% de esta energía (IEA, 2020).

En este momento, las fuentes de energía renovables son ampliamente aceptadas como alternativas a los combustibles fósiles y como soluciones energéticas sostenibles (Yang, Solgaard, & Haider, 2016). Los beneficios del uso de las energías renovables (como su abundancia, sostenibilidad y limpieza) han alentado a muchos países desarrollados y en vías de desarrollo a invertir en estas tecnologías (Rezaei-Shouroki, Mostafaeipour, & Qolipour, 2017) y de esta manera poder aprovechar estos recursos. Dentro de los diferentes tipos de tecnologías se encuentran la de la explotación del viento para producir electricidad (Apostolou & Enevoldsen, 2019). Es por esto que cada vez es más frecuente encontrar este tipo de instalaciones al rededor del mundo.

Según (ONU, 2015), como resultado del análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> para la producción de energía eléctrica utilizando las diferentes tecnologías, una central eléctrica de ciclo combinado por gas emite 400 gramos de dióxido de carbono por cada kWh de energía producida. Por otro lado, una central de carbón con captura y almacenamiento de carbono genera 200 g por cada kWh. Mientras tanto las energías renovables como la fotovoltaica está en un rango de 25 a 32 g en un kWh y la eólica tiene una menor carga de emisiones con un total de 11 gramos de CO<sub>2</sub> por cada kWh producido. Esto hace que la energía eólica sea una de las fuentes con menor carga contaminante que existe actualmente y una alternativa viable para la descarbonización del planeta.

Una de las principales razones por la que se utiliza el viento como energía es por ser limpio, renovable y gratuito. Su explotación actual está enfocada para producción de electricidad y la generación de hidrógeno. En este sentido, se puede obtener electricidad

a la salida de una turbina eólica instalada. Previamente se debe analizar las condiciones del sitio donde el viento tenga velocidad y estabilidad (Mostafaeipour & Abesi, 2015). Por lo tanto, por tener una naturaleza variable y la falta de acoplamiento entre consumo y generación (falta de suministro eléctrico en horas pico y producción excedente en horas de baja demanda), el uso de estos sistemas requiere ciertos complementos (Söder, y otros, 2020). Una opción para aprovechar al máximo esta energía es emplear sistemas de almacenamiento de energía, mediante el hidrógeno.

Con la finalidad de aprovechar la energía eólica se busca emplear aerogeneradores para la producción de hidrógeno. El hidrógeno obtenido se lo denomina hidrógeno verde por provenir de fuentes renovables. El hidrógeno ( $H_2$ ) tiene la cualidad de almacenar cantidades sustanciales de energía durante un largo período de tiempo (Al-Sharafi, Sahin, Ayar, & Yilbas, 2017) sin perder sus propiedades, para luego usar esta energía almacenada en celdas de combustible. El hidrógeno verde surge como uno de los pilares principales para descarbonizar completamente los sistemas energéticos debido a su versatilidad, lo que permite su uso como medio de almacenamiento de energía (Lux & Pfluger, 2020).

Es así que se han impulsado varios trabajos para evaluar el potencial eólico del Ecuador (Orozco, 2018). Actualmente, hay algunos proyectos que están en proceso de estudios como el proyecto Salinas en la provincia de Imbabura, con una potencia estimada de 10 MW (proyecto no operativo). También se realizaron la adjudicación para la concesión, construcción, operación, mantenimiento y revisión de los proyectos eólicos Villonaco II y III, en la provincia de Loja (MERNRR, 2020). Por otra parte, el proyecto Pimo ubicado en la provincia del Azuay ha tomado mucha notoriedad ya que posee buenas condiciones para la construcción de un parque eólico con una gran capacidad de generación energética (Ordoñez & Espinoza, 2019) este proyecto se encuentra en fase de estudios de viabilidad.

Dentro de los proyectos operativos se encuentra la Central Eólica de Villonaco en la provincia de Loja con una potencia instalada de 16,5 MW teniendo un total de 11 aerogeneradores y situándose a 2700 m.s.n.m., el proyecto San Cristóbal en el archipiélago de Galápagos con una potencia instalada de 2,4 MW (CIE, 2021) y el Parque Eólico en la isla Baltra conformado por tres aerogeneradores de 2,25 MW (Vélez, 2016). Estos proyectos son los únicos que se encuentran en funcionamiento en el país

actualmente, sin embargo, se encuentra en la fase II “B” de construcción el Parque Eólico Minas de Huascachaca.

El Proyecto Eólico Minas de Huascachaca se ubica en la comunidad de Uchucay, Parroquia San Sebastián de Yuluc, cantón Saraguro que está situado en la provincia de Loja. Se estima que entre en operación total a finales de 2022, convirtiéndose en el más grande del Ecuador, con una potencia de 50 MW de energía renovable. Mediante este proyecto, se reducirán 76 625 toneladas de CO<sub>2</sub> al año (MEM, 2021). Se estima que tenga una producción media bruta anual de 130 GWh de energía eléctrica (ELECAUSTRO, 2022).

Como una forma para resolver la intermitencia del recurso eólico, se propone la integración de generación de hidrógeno al parque eólico con el uso de la energía eléctrica generada. De esta manera, se flexibiliza la producción y se acopla la disponibilidad de recursos con la demanda del mercado (U.S.-Department-Energy, 2020). En la literatura especializada, se establece que se podría integrar más energías renovables intermitentes en la red, utilizando hidrógeno como sistema de almacenamiento (Ayodele & Munda, 2019) energético. La electricidad generada se suministra a un electrolizador para producir H<sub>2</sub> que se almacena en un tanque apropiado para el efecto (tanques de media y alta presión). El hidrógeno almacenado se utilizará posteriormente (Ishaq, Dincer, & Naterer, 2018) con el fin de proporcionar energía para diferentes necesidades. El objetivo es gestionar la energía mediante electrólisis del agua para producir y almacenar hidrógeno. Este sistema se considera efectivo, respetuoso con el medio ambiente y sostenible (Sorgulu & Dincer, 2018).

En la actualidad, las tecnologías de almacenamiento electroquímico, como las baterías de Ion-Litio, han adquirido un papel importante debido principalmente por su reducción de costes y su alta densidad energética (Aneke & Wang, 2016). Sin embargo, se ha determinado impactos ambientales muy significativos relacionados con la producción de estas baterías y gestión de residuos al final de su vida útil. Es así que se están impulsando tecnologías más limpias, donde destacan las de almacenamiento de hidrógeno (Lin, Zhao, & Wu, 2020) como una de las soluciones más viables. Por este motivo el H<sub>2</sub> puede definir un sistema energético sostenible y más limpio en comparación con otros combustibles fósiles o sistemas electroquímicos, lo que puede resolver problemas ambientales (Nicoletti, Arcuri, Nicoletti, & Bruno, 2015) y evitar cargas contaminantes. Una de las vías de obtención del hidrógeno con el ciclo de vida más bajo de emisiones de gases de

efecto invernadero, a través del proceso de electrólisis del agua utilizando energía eólica se considera actualmente (Douak & Settou, 2015) una de las tecnologías con mayores ventajas.

En este caso, los sistemas de energía de hidrógeno pueden proporcionar soluciones a muchos de los problemas mencionados anteriormente. Ya que su uso no libera gases contaminantes, y el H<sub>2</sub> producido por fuentes de energía renovables como el viento, es un portador de energía limpia (Douak & Settou, 2015) y amigable con el ambiente.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el potencial del Proyecto Eólico Minas de Huascachaca para la producción de hidrógeno verde.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Determinar el potencial de energía eólica, del proyecto Minas de Huascachaca, para cuantificar la energía obtenida.
2. Calcular la producción de electricidad, con los datos obtenidos del proyecto seleccionado, para saber con cuanta energía se cuenta.
3. Estimar los beneficios que se obtienen en la transformación de energía eléctrica a hidrógeno, con la finalidad de cuantificar el almacenamiento, y utilización en vehículos de celda de combustible de hidrógeno.

## **1. CAPÍTULO I: MARCO REFERENCIAL**

### **1.1. Aprovechamiento de la energía eólica**

A través del tiempo la energía eólica se erige como una de las fuentes de energía renovable más destacada, con alta productividad, y ha alcanzado un alto grado de desarrollo tecnológico (Martinez , Flaszynski, & Doerffer, 2018). A pesar de este alto valor de eficiencia, en la literatura se pueden encontrar investigaciones destinadas a mejorar el rendimiento de las turbinas eólicas y aumentar la producción energética de estos sistemas, haciendo así la tecnología más rentable (Saenz-Aguirre, Fernandez-Gamiz, Zulueta, Aramendia , & Teso-Fz-Betono, 2020) y eficiente.

Para aprovechar de una mejor manera las masas de aire en movimiento se puede extraer esta energía mediante el área de barrido de las palas y la velocidad del viento, la potencia de salida es proporcional al cuadrado del radio del rotor y al cubo de las velocidades del viento (Chen, Tiong, Tan, Koh, & Fong, 2018) (Attig-Bahar, Ritschel, Akari, Abdeljelil, & Amairi, 2021). Por lo tanto, se han explorado innovaciones para aumentar el tamaño del rotor y las palas como es el caso del prototipo de aerogenerador MySE 16.0-242, cuyas palas son de 118 metros de largo y un área de barrido de 46 000 metros cuadrados con una potencia estimada de 16 MW. Según la empresa MingYang (Durakovic, 2021) este prototipo de aerogenerador es uno de los más grandes actualmente y de mayor potencia de generación.

Una revisión de la literatura muestra la existencia de varias soluciones que van desde el diseño de nuevas estrategias de control basadas en la actualización y mejoramiento del software, hasta el diseño e introducción de nuevos elementos físicos destinados a mejorar la calidad de la energía eléctrica generada o el rendimiento aerodinámico de las palas de los aerogeneradores. En consecuencia, el rendimiento y la producción energética del sistema se pueden aún mejorar significativamente (Baldacchino, Ferreira, Tavernier, Timmer, & Bussel, 2018) aplicando estos avances.

### **1.2. Producción de hidrógeno**

El hidrógeno se obtiene través de un sistema de electrólisis de agua cuya energía de entrada es suministrada por una turbina eólica (Rezaei, Mostafaeipour, Moftakharzadeh, Qolipour, & Salimi, 2019). Existen varios tipos y métodos para producir hidrógeno, en los que cada método depende de la fuente de energía utilizada, como son: termólisis

(Wajda & Kamiel, 2019) (Cong, y otros, 2016), pirólisis (Cho, Lee, Jung, & Park, 2019) (Barbarias, y otros, 2018) y electrólisis (Lonis, Tola, & Cau, 2021) (Zhang, y otros, 2020). Estos sistemas se basan principalmente en calefacción, refinación y electricidad respectivamente. Cada sistema requiere insumos específicos para producir hidrógeno y otros tipos de productos (Mahmoud, Ramadan, Naher, & Pullen, 2021). Dentro de estos sistemas que se utilizan para producir H<sub>2</sub> destaca la electrolisis por sus grandes beneficios, sus altas eficiencias y el desarrollo tecnológico.

Los métodos de separación del agua más comúnmente utilizados se conocen como electrólisis o separación electroquímica del agua (Nguyen, Abdin, Holm, & Merida, 2019). Existen algunos tipos de procesos de separación del agua, pero los más significativos son electrólisis alcalina (Zeng & Zhang, 2010) y electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM) (Kumar & Himabindu, 2019), estos sistemas son los más avanzados actualmente y los más difundidos. En los dos casos se requiere electricidad como entrada para activar el circuito que va a realizar el proceso de división. La característica principal de la electrólisis alcalina es el uso de una solución de sales y de la temperatura del agua que ingresa al electrolizador. Por lo general, la electrólisis PEM utiliza una membrana de intercambio de protones para realizar el proceso (Mahmoud, Ramadan, Naher, & Pullen, 2021).

### **1.3. Producción de hidrógeno mediante electrolisis usando energía eólica**

Para producir hidrógeno mediante el uso de energía eólica consta de un proceso de conversión energética (es decir, turbina eólica, caja de cambios, generador eléctrico), y rectificador, que convierte la salida de voltaje de corriente alterna (CA) en corriente continua (CC). Con esta energía rectificada se suministra a un electrolizador para dividir la molécula del agua (H<sub>2</sub>O) con la finalidad de almacenar el hidrógeno en contenedores de alta o media presión (Ayodele & Munda, 2019) según sea las necesidades del sistema donde se va a usar.

La electrólisis en un medio acuoso es simplemente el paso de una CC entre un sistema de separación PEM para dividir electroquímicamente la molécula de agua (Olateju, Kumar, & Secanell, 2016). Para lograr esto, se utiliza electricidad basada en la energía eólica; la energía es extraída de una masa de aire por la turbina eólica y convertida en energía mecánica. La turbina eólica impulsa el generador eléctrico a través de la caja de engranajes para producir electricidad. La electricidad generada se rectifica a una salida

de CC y luego se utiliza para la electrólisis. El agua suministrada en este proceso debe estar libre de impurezas ya que de esto dependerá la pureza del gas producido. Con los elementos nombrados se puede realizar la producción de hidrógeno a través del electrolizador pasando electricidad a través del sistema PEM dividiendo el H<sub>2</sub>O en dos moléculas y pudiendo así almacenar H<sub>2</sub> en estado gaseoso como se representa en la Ilustración 1 mediante el esquema de generación de hidrogeno verde.

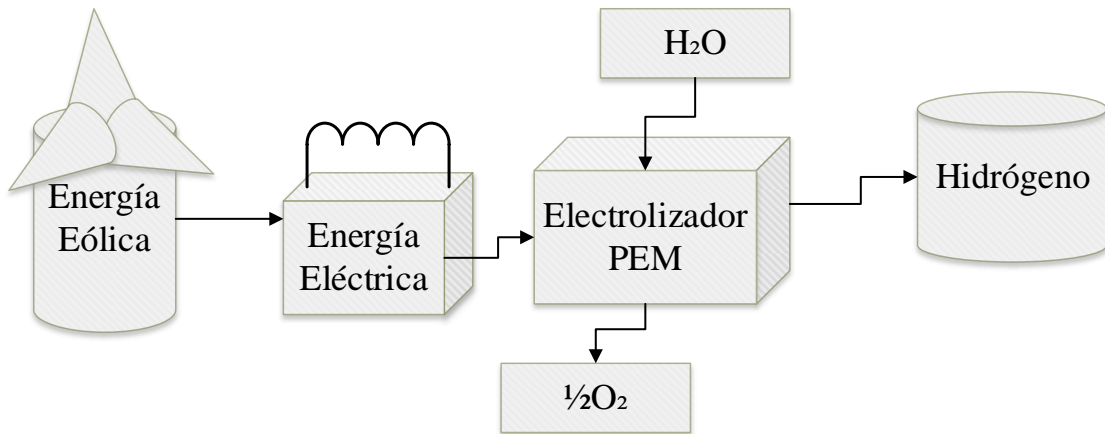


Ilustración 1 - Esquema de generación de hidrógeno verde (Autor).

#### 1.4. Electrolizador alcalino

El proceso de electrólisis de solución alcalina se compone del ánodo, cátodo, electrolito y un diafragma poroso como separador. En donde las moléculas de la solución alcalina (KOH / NaOH) mediante una reacción electroquímica se reducen a una molécula de hidrógeno y se producen dos iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>). Este proceso opera a temperaturas de 30-80 °C con la solución alcalina como electrolito y una concentración de 20% a 30% (Burnat, y otros, 2015) (Seetharaman, Balaji, Ramya, Dhathathreyan, & Velan, 2013). En el proceso de electrólisis de agua alcalina, se utilizan diafragmas de Zifron y materiales de níquel como electrodos, según la tecnología seleccionada. El diafragma está situado en el medio de la celda ya que separa el cátodo y el ánodo. También separa los gases producidos de sus respectivos electrodos y evita la mezcla de estos elementos, con la finalidad de poder extraer el H<sub>2</sub> para su almacenamiento. Sin embargo, la electrólisis alcalina presenta aspectos negativos como bajas densidades de corriente (por debajo de 400 mA/cm<sup>2</sup>), baja presión de funcionamiento y una eficiencia energética que varía de 47% a 82% (Kumar, Ramakrishna1, D. Srinivasulu, Bhagawan, & Himabindu, 2017) (Marini, y otros, 2012). En las últimas investigaciones, se está desarrollando un nuevo enfoque en las tecnologías de electrólisis alcalina de membranas de intercambio aniónico



(AEM) que están compuestas por polímeros con conductividad aniónica en lugar de diafragma (Marinkas, y otros, 2018) (Sandeep, y otros, 2017) (Hwang, Lim, Bong, Ryu, & Choi, 2015). Con el objetivo de alcanzar mayor eficiencia energética y tener un uso prolongado.

### **1.5. Electrolizador de membrana de intercambio de protones**

En comparación con el electrolizador de agua alcalina, el electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM) puede generar hidrógeno ofreciendo mayores beneficios que otros métodos (Abdol Rahim, Tijani, Kamarudin, & Hanapi, 2016) (Schmidt, y otros, 2017). Un electrolizador PEM es un dispositivo que se basa en un proceso electroquímico que se utiliza para dividir las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno (Holladay, Hu, King, & Wang, 2009) (Roberts, Wang, & Naterer, 2012). Este método produce mayores cantidades de H<sub>2</sub> y es eficiente, ofreciendo muchas ventajas sobre otras tecnologías de electrólisis ya que requieren menores espacios para instalar los equipos, mayores densidades de corriente, mejores niveles de seguridad, generando un gas con altos niveles de compresión y un mayor grado de pureza (Carmo, Fritz, Mergel, & Stolten, 2013) (Lehner, Tichler, Steinmüller, & Koppe, 2014) siendo una de las formas de producción de H<sub>2</sub> con mejores resultados en la actualidad.

Este sistema está compuesto por ánodo y cátodo que están separados con la membrana de intercambio de protones. Las moléculas de agua se dividen en el ánodo y el hidrógeno es transferido a través de la membrana desde el ánodo hasta el cátodo (Marshall, Børresen, Hagen, Tsytkin, & Tunold, 2007) (Siracusano, y otros, 2012), donde se descompone en hidrógeno y oxígeno. En este proceso se suministra energía eléctrica para transformar a energía química. Los electrones y protones se recombinan en el cátodo para liberar hidrógeno en estado gaseoso (Abdol Rahim, Tijani, Kamarudin, & Hanapi, 2016). Actualmente los investigadores han estudiado diferentes materiales para los electrolizadores PEM para disminuir el voltaje de la celda, mejorando el rendimiento del sistema y logrando un bajo costo del material. Se han centrado estos avances en colectores de corriente (Ito, Maeda, Nakano, Kato, & Yoshida, 2013), placas bipolares (Nie & Chen, 2010) (Langemann, Fritz, Müller, & Stolten, 2015), catalizadores (Kokoh, y otros, 2014) y membranas (Baglio, Siracusano, Lufrano, Staiti, & Aricò, 2013) haciendo que esta tecnología sea cada vez más utilizada para la producción de H<sub>2</sub> y con menores costos de generación.

## **1.6.Sistemas basados en celdas de combustible**

El desarrollo de esta tecnología se centra en el abastecimiento energético para las diferentes aplicaciones como las celdas de combustible que fueron desarrolladas como fuentes de energía para aplicaciones de transporte, estacionarias y portátiles como alternativas a los motores de combustión interna, transporte ferroviario, baterías y otro tipo de sistemas para la obtención de energía (Jia, Tan, Kang, & Zhang, 2014) (Luo & Jiao, 2018) (Yao, y otros, 2020). Una celda de combustible es un dispositivo de almacenamiento de energía amigable con el medio ambiente el cual contiene hidrógeno para utilizarlo más tarde, cuando sea necesario, con el fin de proporcionar electricidad (Jannati & Nazarpour, 2017) (Nojavan, Zare, & Mohammadi-Ivatloo, 2017) a un sistema de consumo de energía. Esta tecnología ha experimentado un desarrollo significativo recientemente, ya que se puede utilizar en una amplia variedad de aplicaciones (Khanmohammadi, Saadat-Targhi, Waly Ahmed, & Afrand, 2020) como es el uso en el transporte. Es por esto que esta tecnología tiene un gran potencial en la industria automotriz por sus altos valores de eficiencia, potencia, funcionamiento a bajas temperaturas y cero emisiones (Tajiri, Tabuchi, & Wang, 2007) mediante el uso de vehículos de celda combustible. Una de las grandes ventajas de estos sistemas es que pueden trabajar por largas jornadas y repostar combustible en periodos de tiempo cortos (MathWorks, 2022).

## **1.7.Tipos de almacenamiento**

Las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno se pueden clasificar según el estado físico del hidrógeno: gas comprimido, líquido y en estado sólido. El método de almacenamiento de gas comprimido se elige para almacenar hidrógeno en proyectos a gran escala debido a la disponibilidad tecnológica y la eficiencia energética (Crotofino, 2016) (Makridis, 2016) (Godula-Jopek, 2015). En comparación con el almacenamiento gaseoso, la licuefacción de hidrógeno proporciona una alta densidad de almacenamiento, que también es adecuada para el almacenamiento de hidrógeno a gran escala. Sin embargo, esta tecnología requiere una gran cantidad de energía (aproximadamente del 30% al 40% del contenido energético del hidrógeno) para el proceso de licuefacción y el mantenimiento de baja temperatura (Makridis, 2016) por este motivo esta tecnología no se considera viable y es poco eficiente. Haciendo que el almacenamiento de hidrógeno gaseoso sea un método de acopio favorable y también los sistemas que se han desarrollado

actualmente funcionan con H<sub>2</sub> en estado gaseoso para los procesos posteriores (Nguyen, Abdin, Holm, & Merida, 2019).

A pequeña escala, el hidrógeno se puede almacenar en tanques presurizados que ofrecen flexibilidad para el transporte y distribución. Sin embargo, cuando las condiciones geológicas crean cavernas subterráneas adecuadas, se pueden utilizar para almacenar hidrógeno a gran escala. El almacenamiento subterráneo tanto de hidrógeno, como de gas natural son similares; se clasifican según la formación geológica, que incluye la caverna de sal, el acuífero, un depósito de gas agotado y roca dura. Dentro de estas opciones, una caverna de sal (una cavidad construida artificialmente en una formación de sal profunda) es la mejor opción para el almacenamiento de hidrógeno porque mantiene la pureza del hidrógeno ya que la sal de roca es inerte al hidrógeno (Crotogino, 2016).

### **1.8. Vehículos eléctricos con celdas de combustible**

Las tecnologías de hidrógeno y celdas de combustible pueden apoyar la transformación de la energía verde, y se demuestra con la alimentación de vehículos eléctricos de celda combustible y la prestación de servicios de almacenamiento de energía (Ehret & Bonhoff, 2015). Hoy en día, los vehículos eléctricos de celda de combustible (VECC) se están desarrollando vigorosamente, y esta es también una de las principales direcciones de aplicación de la energía del hidrógeno. Un VECC de hidrógeno es esencialmente un vehículo de cero emisiones. La celda de combustible no tiene proceso de combustión. Si se utiliza hidrógeno puro como combustible, los VECC alimentan su motor transformando la energía química del hidrógeno en electricidad. La mayoría de los VECC se refieren a los VECC de hidrógeno (Lin, Zhao, & Wu, 2020).

Los vehículos eléctricos de celda de combustible de H<sub>2</sub> no emiten emisiones de carbono (Robledo, Poorte, Mathijssen, Van der Veen, & Van Wijk, 2019). Por este motivo, los VECC de hidrógeno son importantes para el sector automotriz y con la finalidad de generar energía limpia. El desarrollo de estas tecnologías tiene como objetivo lograr una producción de energía cero emisiones (Robledo, Oldenbroek, Abbruzzese, & Van Wijk, 2018).

También es importante destacar el desarrollo tecnológico para impulsar autobuses urbanos que posean algún tipo de baterías recargables con pilas de combustible de

hidrógeno. Proyecto que generaría la gran venta de la utilización de combustible alternativo y con bajas emisiones (Miranda , Carreira, Icardi, & Nunes, 2017).

Mediante las investigaciones del diseño y la eficiencia de los automóviles eléctricos de celda a combustible, especialmente para reemplazar la tecnología de motores de combustión interna por estos vehículos. Se estudia configuraciones que permitan mayor autonomía de los VECC de hidrógeno a bajo costo, resultando ser más competitivos con otras tecnologías actuales del mercado automovilístico (Hames, Kaya, Baltacioglu, & Turksoy, 2018) (Wilberforce, y otros, 2017). La intención es que estos coches tengan una mayor demanda y sean más interesantes para los potenciales usuarios.

En el caso de los vehículos ligeros, el Toyota Mirai se considera un vehículo más representativo, ya que actualmente tiene la mayor participación en el stock de vehículos eléctricos de celda de combustible de H<sub>2</sub> del mundo (Kane, 2018). Algunas de las características más importantes de este nuevo modelo son de la capacidad del tanque de H<sub>2</sub> con una carga de 5,6 kg en sus dos versiones XLE y Limited, teniendo una autonomía de 650 km aproximadamente (Toyota, 2021). Hyundai también ha hecho lo suyo dentro del desarrollo de esta tecnología. En el 2013 lanzaron al mercado el modelo ix35 fuel cell, convirtiéndose en los primeros en comercializar VECC de hidrógeno, siendo el primer fabricante automotriz en producir este tipo de vehículos en masa. Actualmente se encuentra en stock la segunda generación del modelo NEXO teniendo una autonomía de 666 km y una capacidad de almacenamiento de 6,7 kg (Hyundai, 2018). Por otra parte, el fabricante de vehículos BMW presentó, en la feria automovilística de Múnich en el año 2021, su prototipo el modelo iX5 de celda combustible de hidrógeno el cual posee un tanque de almacenamiento de H<sub>2</sub> de 6 kg con una autonomía aproximada de 700 km (Smith, 2021) (Bruce, 2021). Siendo estas marcas de vehículos las más representativas dentro de esta tecnología.

## 2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto, se integra un conjunto de actividades que se aplican para recabar información y los datos necesarios para caracterizar el sistema experimental. Para la investigación se han considerado tres etapas: levantamiento de información, obtención de datos y cálculo como se muestra en la Ilustración 2. En la primera etapa se debe realizar una investigación con la cual se pueda recopilar la mayor cantidad de información. Mientras tanto en la segunda etapa se debe obtener los datos del proyecto eólico Minas de Huascachaca. Finalmente se realiza los cálculos correspondientes.

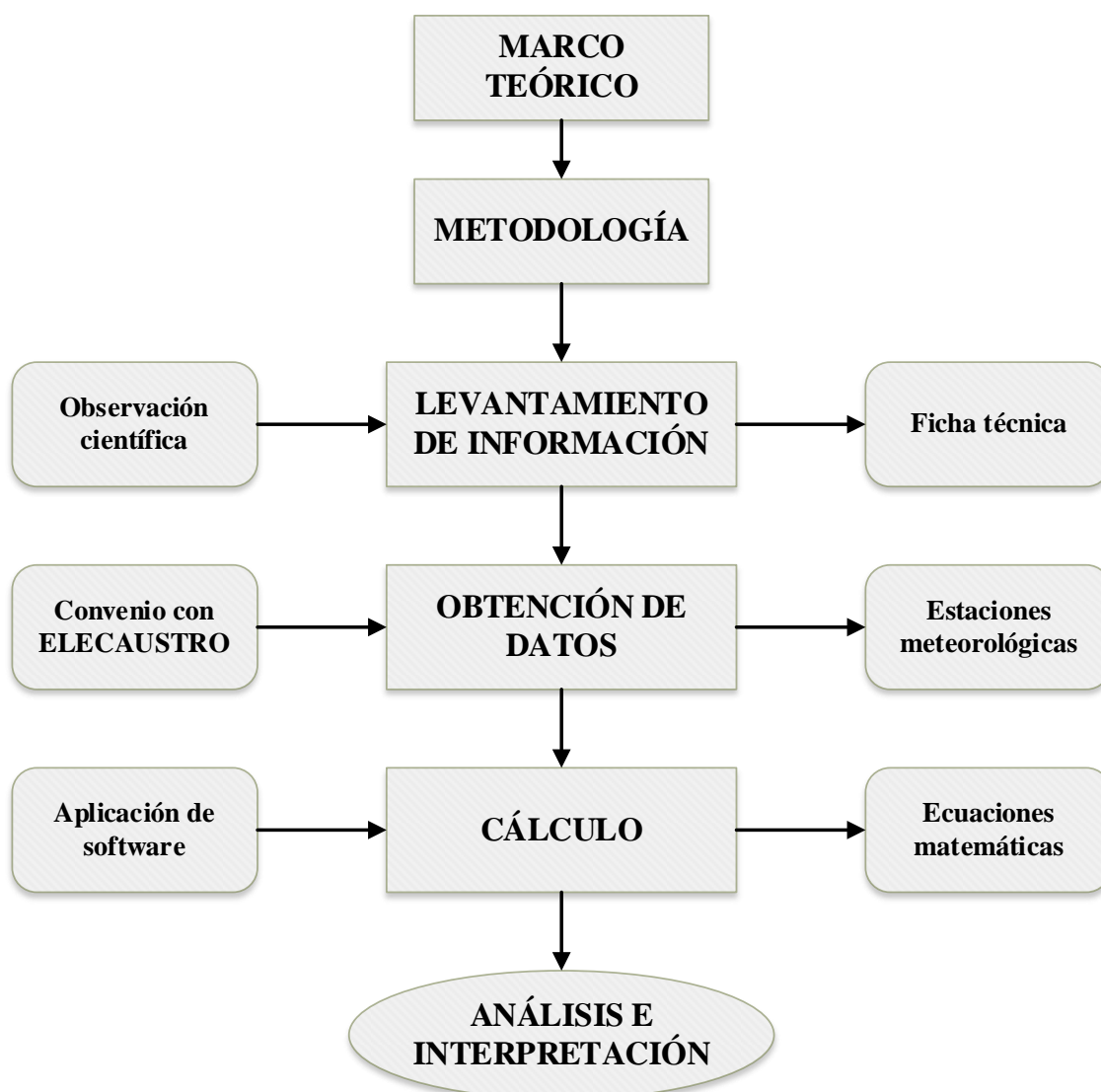


Ilustración 2 - Diagrama de flujo de metodología (Autor).

## 2.1. Ubicación del proyecto eólico

El punto de estudio seleccionado es el Parque Eólico Minas de Huascachaca (PEMH), por su importancia energética dentro de la producción de energías renovables en el país.

Según fuentes oficiales (MEM, 2021), el proyecto está ubicado en la parroquia San Sebastián de Yuluc del cantón Saraguro, provincia de Loja. Este proyecto se encuentra en la fase final de construcción (segunda II fase) el cual tendrá una potencia de 50 MW aproximadamente con un total de 14 aerogeneradores de una potencia de 3,57 MW cada uno. Se estima que el proyecto entre en operación a finales del 2022, convirtiéndose así en el parque eólico más grande del país.

En la Ilustración 3 se muestra la ubicación del proyecto eólico y su área de influencia.

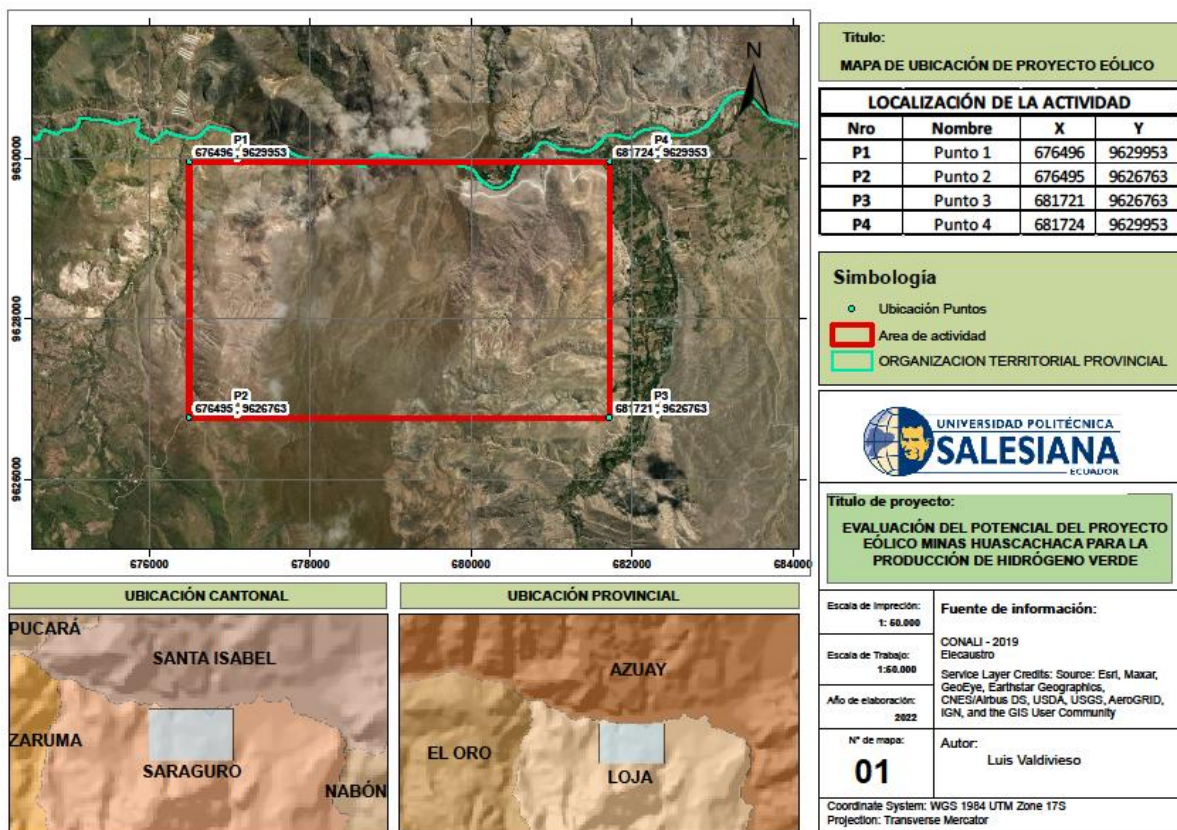


Ilustración 3 - Ubicación del proyecto eólico Minas de Huascachaca. (Autor)

## 2.2. Obtención de datos

Los datos fueron obtenidos de las estaciones meteorológicas de la marca NRG, instaladas por la empresa ELECAUSTRO en la zona de influencia del proyecto eólico. Las estaciones recaban información sobre temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, presión barométrica, radiación solar, entre otros parámetros. Para este caso de estudio, sólo se requiere las velocidades promedio del viento medidas por un anemómetro a una altura de 80 metros del suelo. La información medida por este equipo se realizó cada 3 segundos en un periodo de tiempo de 10 minutos los cuales se promediaron y se proporcionó resultados para realizar el estudio. Los valores de las mediciones entregados por la empresa fueron del 23 de mayo del 2012 al 9 de septiembre del 2021, con un total de 412 089 datos, los mismos que se promediaron para obtener la velocidad del viento por cada hora adquiriendo 68 683 valores. Después de esto se seleccionó el año 2017 ya que este tiene una serie de datos completa. Con esta información se analizó este caso de estudio (ver [Anexo 4](#)).

## 2.3. Ficha técnica de los aerogeneradores

Los aerogeneradores adquiridos para el proyecto eólico son de la marca DONGFANG ELECTRIC INTERNATIONAL, fabricados por la empresa China. Los equipos tienen las siguientes características como lo muestra la Tabla 1 (ver [Anexo 1](#)).

DATOS GENERALES		
Descripción	Valor	Unidad
Potencia:	3,57	MW
Altura del buje:	90	m
Diámetro rotor:	148	m
Área de barrido:	17 203	m <sup>2</sup>
Velocidad min:	2,5	m/s
Velocidad máx.:	20	m/s

Tabla 1 – Características generales aerogenerador (ARC, 2022).

## 2.4. Curva de potencia

Para el cálculo de la producción de energía es necesario conocer la curva de potencia del aerogenerador. Según (ARC, 2022) mediante los datos obtenidos en el proyecto eólico de presión atmosférica y temperatura con las mediciones de las estaciones meteorológicas, el valor que más se ajusta a la densidad del aire es 1,044 kg/m<sup>3</sup>. Con esta información que

corresponde a las condiciones del sitio se obtiene la curva de potencia del aerogenerador de 3570 kW que está representada en la Ilustración 4, en el eje de las abscisas se encuentra la velocidad del viento en unidades de metros sobre segundos mientras que en el eje de las ordenadas esta los valores de la potencia del viento en kW (ver [Anexo 2](#)).

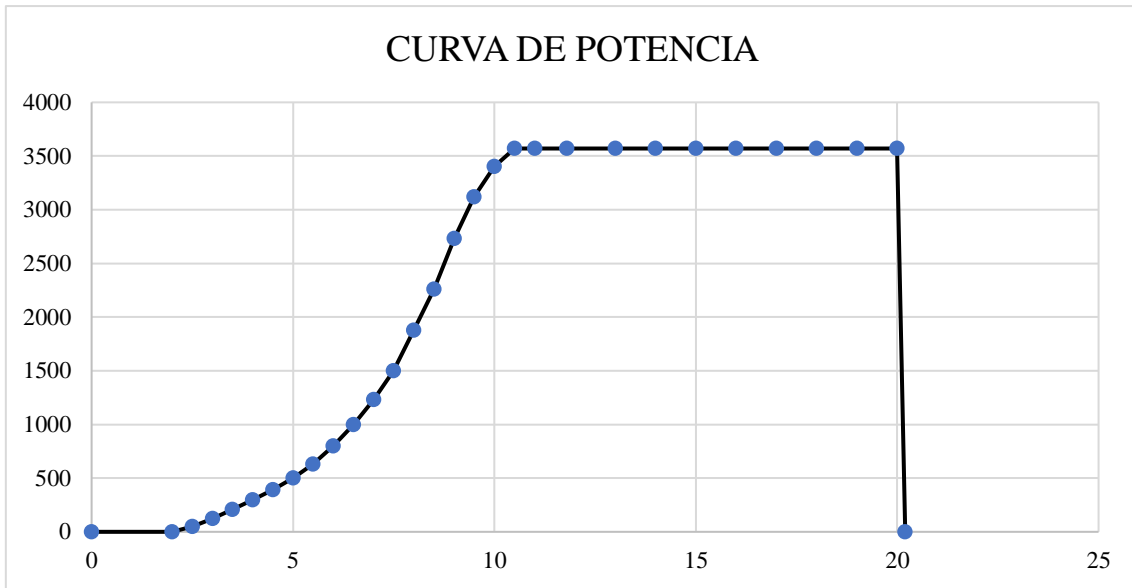


Ilustración 4 - Curva de potencia. (Autor)

## 2.5. Rugosidad del terreno

Las características de los terrenos son diferentes ya que cada sitio tiene distintas condiciones debido a su naturaleza y composición. El parámetro  $z_0$  se usa para representar numéricamente la longitud de rugosidad (Villarrubia, 2007) como muestra la Tabla 2 en donde se describe el tipo de terreno con sus valores referenciales.

Para el caso de estudio se utilizó la clase de rugosidad de 1,5 ya que el proyecto se encuentra a una altura de 1150 a 1350 m.s.n.m., proporcionando las condiciones del tipo de emplazamiento de la zona de influencia parque eólico para poder corregir la velocidad del viento. Siendo el valor  $z_0$  que corresponde a la longitud de la rugosidad del terreno igual a 0,055 metros, el cual se utilizó para realizar los cálculos correspondientes.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad $Z_0$	TIPO DE TERRNO
0	0,0002	Superficie de agua. Terreno abierto, superficie lisa.
0,5	0,0024	Pistas de hormigón (aeropuertos), césped.
1	0,03	Campos abiertos sin cercados ni setos. Edificios muy dispersos. Colinas suavemente redondeadas



1,5	0,055	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8 metros. Situado como mínimo a 1250 m.s.n.m.
2	0,1	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8 metros. Situado como mínimo a 500 m.s.n.m.
2,5	0,2	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8 metros. Situado como mínimo a 250 m.s.n.m.
3	0,4	Pueblos, bosques, terreno accidentado y desigual.
3,5	0,8	Ciudades con edificios altos.
4	1,6	Grandes ciudades con edificios muy elevados.

Tabla 2 - Clases y longitudes de rugosidades del terreno. (Cochancela & Astudillo , 2012)

Para el cálculo de las velocidades del viento a 90 metros de altura (altura del buje) se debe realizar un cálculo que permita saber el valor real que tiene las velocidades a esa elevación, ya que los valores medidos por el anemómetro son a 80 metros. Para esto aplicamos la siguiente Ecuación 1 para el cálculo de la variación de la velocidad con la altura.

$$v_2 = v_1 \frac{\ln \frac{h_2}{z_0}}{\ln \frac{h_1}{z_0}}$$

Ecuación 1 - Corrección de la velocidad.

Donde:

$h_1$ : altura donde fueron recolectados los datos

$h_2$ : altura donde se encuentra el buje

$v_1$ : velocidad medida

$v_2$ : velocidad corregida

Este modelo es recomendado para alturas que no excedan de 100 metros del suelo y para terrenos que no superen la clase 3 de rugosidad del sitio (UPME, 2003).

Con la velocidad corregida a una altura de 90 metros se realizaron los cálculos necesarios para poder analizar el comportamiento del viento en el periodo de tiempo descrito.

## 2.6. Modelamiento de la curva de distribución del viento

### 2.6.1. Distribución de probabilidad de Weibull

Es importante predecir el viento en varios lugares del mundo, por lo tanto, se determinó que la distribución de Weibull es una de las más apropiadas para estimar las variaciones que tiene el viento (Jimoh, Ayodele, Munda, & Agee, 2012) (Ayodele, Jimoh, Munda, & Agee, 2013). Por este motivo es una herramienta usada para la predicción de comportamiento de las masas de aire (Tamboreno, 1994), siendo una de funciones más utilizadas para el manejo de (Salazar Moreno, Fritz, Lopez, & Rojano, 2017) una serie de datos meteorológicos como la velocidad del viento. La distribución de Weibull está definida por dos parámetros, de escala y de forma (C y k respectivamente) (Creus Solé, 2008). La Ecuación 2 está representada de la siguiente manera:

$$f(v) = \frac{k}{C} * \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} * \exp^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k}$$

*Ecuación 2 - Distribución de la probabilidad de Weibull en función del viento.*

Donde:

k: es el parámetro de forma

f(v): función de velocidad del viento

C: es el parámetro de escala

Para el cálculo de las variables de esta función se debe realizar una deducción de la ecuación lineal (ver [Anexo3](#)).

**Distribución acumulativa:** describe la función acumulativa del viento en el intervalo de 0 a v como se representa en la Ecuación 3:

$$\int_0^v f(v)dv = \int_0^v \frac{k}{C} * \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} * \exp^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k} dv = 1 - \exp^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k}$$

*Ecuación 3 - Distribución de la probabilidad de Weibull acumulativa.*

### 2.6.2. Distribución de probabilidad Beta

En la literatura especializada se recomienda varios tipos de distribución para poder predecir el comportamiento del viento, pero es difícil encontrar una función (Bruninx & Delarue, 2014) que se ajuste a las condiciones únicas de un proyecto eólico. Sin embargo,

se ha demostrado que la distribución beta se ajusta más que algunas distribuciones (Bludszuweit, Dominguez-Navarro, & Llombart, 2008) (Liu, 2010) ya que tiene una amplia versatilidad, también la forma dependerá de los parámetros que intervienen. Estos son definidos por el comportamiento de las masas de aire (Prátula, Petris, Guillermo, Rossi, & Bocero, 2009) las cuales dan características únicas a la distribución del viento. Mediante los datos históricos a través de la distribución beta, se puede predecir la densidad de probabilidad del viento en una determinada región o sitio (Luo, Nie, Yang, & Zhou, 2021).

La distribución de probabilidad beta generalizada es usada para representar una serie de datos con la finalidad de realizar modelamiento y comportamiento de las curvas de casos de estudio aplicables al campo de la ingeniería (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012). Esta función está comprendida en el intervalo (0,1) en donde intervienen dos parámetros de forma  $\alpha$  y  $\beta$ , que toman un valor positivo (CrystalBall, 2013). Donde la función de la densidad viene dada por la Ecuación 4.

$$f(v) = \frac{v^{\alpha-1} * (1-v)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}$$

*Ecuación 4 - Distribución de probabilidad Beta en función del viento.*

Donde:

$v$ : velocidad del viento

$f(v)$ : función de velocidad del viento

$\alpha$ : parámetro de forma;  $> 0$

$\beta$ : parámetro de forma;  $> 0$

$B(\alpha, \beta)$ : función beta

### 2.6.3. Función Beta

La función beta en su forma general se encuentra en un intervalo de 0 a 1 y está representada por la Ecuación 5.

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 v^{\alpha-1} * (1-v)^{\beta-1} dv$$

$$B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha) * \Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)}$$

*Ecuación 5 - Función beta con parámetros de forma.*

Donde:

$\Gamma$ : función gama

$\alpha$ : parámetro de forma;  $> 0$

$\beta$ : parámetro de forma;  $> 0$

Para el caso de estudio se calculó los parámetros de  $\alpha$  y  $\beta$  siendo los siguientes valores:

$$\alpha = 0,6686$$

$$\beta = 1,4371$$

Con los valores de las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  se pudo calcular la función beta.

$$B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(0,6686) * \Gamma(1,4371)}{\Gamma(0,6686 + 1,4371)}$$

$$B(\alpha, \beta) = \frac{1,1963}{1,0493}$$

$$B(\alpha, \beta) = 1,14$$

#### **2.6.4. Determinación de la potencia media acumulada de salida**

Para calcular la potencia media de salida se utiliza la Ecuación 6. Donde  $Pms$  es la potencia media de salida la cual se calcula mediante la suma de las potencias instantáneas a diferentes velocidades del aerogenerador y se las divide para 2. Luego se multiplica por la función de densidad de probabilidad Beta que es con la que se va a realizar los cálculos para cuantificar la energía generada por el proyecto.

$$Pms = \frac{Pi_{n-1} + Pi_n}{2} * f(v)$$

*Ecuación 6 - Potencia media acumulada de salida.*

Donde:

$Pi$ : potencia instantánea (potencia del aerogenerador según la velocidad del viento)

$f(v)$ : función de probabilidad del viento (distribución de probabilidad Beta)

### **2.6.5. Cálculo de la energía anual**

Con la finalidad de determinar la energía anual extraíble del proyecto eólico Minas de Huasachaca se utiliza la Ecuación 7. Para esto, se debe multiplicar la potencia media de salida multiplicada por 8760, que corresponde al total de horas que tiene un año. Esta es la energía de un aerogenerador que está expresada en kWh.

$$E. \text{ anual} = P_{msa} * 8760$$

*Ecuación 7 - Energía anual.*

### **2.7. Elección de la distribución**

Los estudios actuales han proporcionado información que ayuda a describir las funciones de densidad de probabilidad del viento como la de Weibull, Beta, entre otras (Khorramdel, Zare, Chung, & Gavriiadis, 2020). Sin embargo, hay condiciones que impiden que las curvas de dichas distribuciones se ajusten a los valores reales, por tal motivo es fundamental contrastar esta información con programas que ayuden a simular el comportamiento de los datos obtenidos en el proyecto eólico Minas de Huasachaca.

Mediante el uso de la herramienta Crystal Ball en el programa Excel se simuló las diferentes distribuciones como la de Weibull y Beta, principalmente ya que estas funciones son las más utilizadas en el área de la energía eólica dentro de la literatura especializada. Este proceso se lo realiza con el objetivo de evaluar cual distribución es la que más se ajusta a los datos obtenidos para el caso de estudio. Se analizó los resultados mediante la prueba de bondad de Anderson-Darling (A-D) la que facilita la comparación y análisis, de esta manera poder elegir la distribución más adecuada para el caso de estudio.

Con el uso del estadístico de A-D se realiza una prueba la distribución seleccionada y el conjunto de datos reales (Jensen & Alexander, 2016) con la finalidad de comprobar el ajuste de varias distribuciones y así poder determinar cuál es la más adecuada. Sin embargo, para poder seleccionar la distribución que más se ajusta se debe tomar el valor más bajo de la evaluación A-D (Minitab, 2018) con la finalidad de poder escoger la distribución que tiene el comportamiento más semejante al de los datos reales.

Con la herramienta Crystal Ball se simularon las distribuciones de Weibull y Beta como se muestra en las Ilustraciones 5 y 6 haciendo una comparación con los datos del proyecto.

Mediante estas gráficas se puede apreciar cuál de las distribuciones es la que más se ajusta y con la prueba de A-D se demostró que la distribución beta es la más apropiada ya que describe mejor la curva de los datos reales del proyecto. Hay que mencionar que para estas simulaciones se utilizaron todos los datos del proyecto para que las gráficas se ajusten lo más posible con la realidad.

Por lo tanto, para los cálculos de la producción energética que se realizaran en el Capítulo 3 se utilizará la distribución de probabilidad Beta con los parámetros presentados en la Sección 2.6.3.

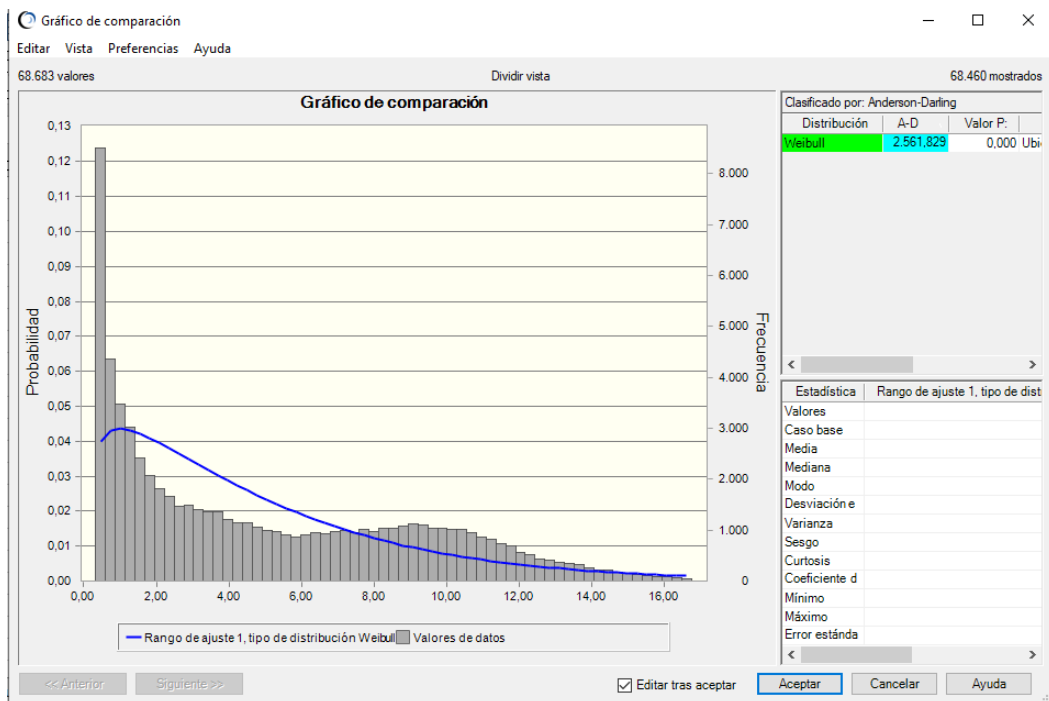


Ilustración 5 - Comparación de distribución de Weibull (Autor).

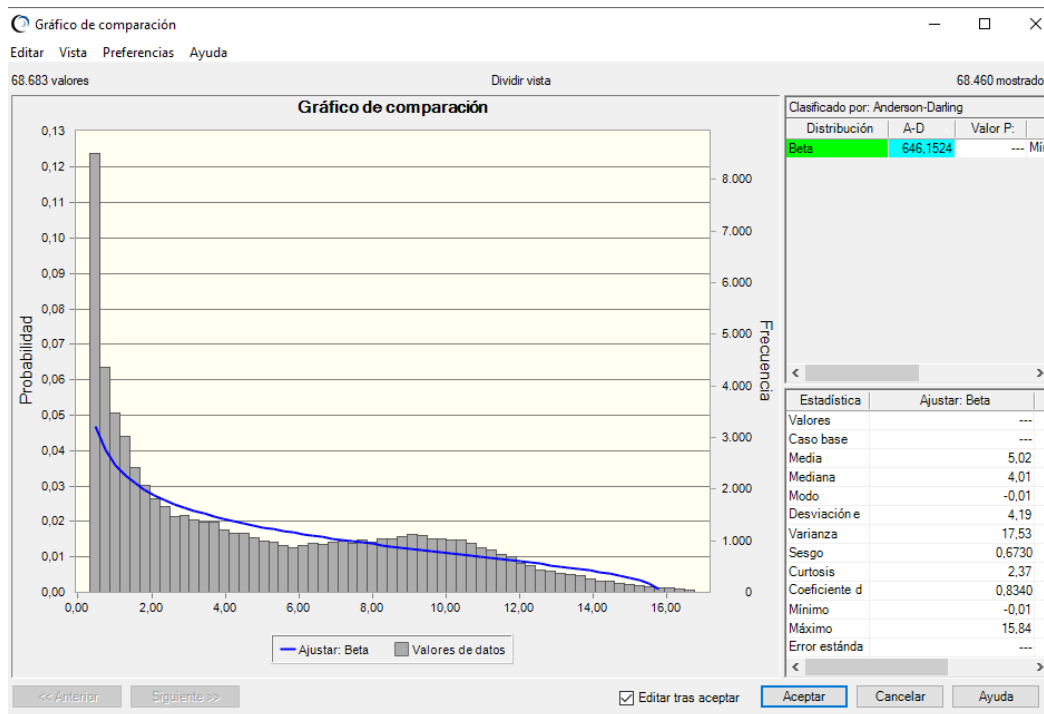


Ilustración 6 - Comparación de distribución de Beta (Autor).

## 2.8. Método cinológico del histograma y curvade potencia

Mediante el uso de este método se requiere una serie de velocidades del viento en un determinado periodo de tiempo, con la finalidad de comparar la curva de potencia del aerogenerador para adquirir la potencia eólica generada y finalmente poder calcular la energía media en el periodo de tiempo analizado (Carta Gonzalez, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009).

Para realizar el cálculo aplicando este método se utiliza el histograma de las horas anuales de las velocidades medias del viento y las potencias de la aeroturbina en dichas velocidades como se muestra en la Ecuación 8.

$$E. Producida = H. año * P. instantánea$$

Ecuación 8 - Energía producida

## 2.9. Producción de hidrógeno

### 2.9.1. Electrolizador para transformar energía en hidrógeno

Actualmente existen muchos tipos de electrolizadores de agua disponibles comercialmente para la producción de hidrógeno siendo los más utilizados los electrolizadores alcalinos y los de membrana de intercambio de protones (PEM). La

mayoría de los electrolizadores que ofrece el mercado funcionan en un medio alcalino (solución de KOH al 30% en peso) a temperaturas de 60 a 80 °C. Ofreciendo una presión de funcionamiento que varía de 5 bar para los electrolizadores convencionales y de 10 a 30 bar para los electrolizadores avanzados (Stojic, Grozdić, Umićević, & Maksić, 2008).

Se seleccionó el electrolizador PEM porque supera los problemas de baja corriente, densidad de hidrógeno, carga parcial y funcionamiento a baja presión que son los problemas principales de los electrolizadores alcalinos. Mientras tanto el PEM utiliza platino y otros componentes dependiendo del tipo de tecnología que se emplea como electrodo haciendo que el costo de esta tecnología sea elevado. Este electrolizador además ofrece tiempos de respuesta cortos, amplios rangos operativos, altas eficiencias y purezas de gas (muy elevadas, 99,999% aproximadamente) (AREVA\_H2GEN, 2019). Esto hace que el H<sub>2</sub> obtenido podrá usarse directamente sin purificación adicional (Hinkley, Hayward, McNaughton, & Gillespie, 2016). Hay que tener en cuenta que estos niveles de pureza dependen mucho de la calidad del agua suministrada al sistema.

En la Ilustración 7 se muestra un esquema de funcionamiento de un electrolizador PEM con sus componentes más relevantes. La energía primaria es suministrada por el viento mediante un aerogenerador, el cual alimentará un circuito para rectificar la energía de corriente alterna a corriente continua. La energía rectificada entrará al electrolizador PEM para poder dividir las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. Este dispositivo está conformado por ánodo, membrana y cátodo. El agua ingresa en el ánodo donde se divide la molécula de H<sub>2</sub>O mediante la energía eléctrica suministrada al electrolizador. Posteriormente los iones de H<sup>+</sup> pasan a través de la membrana para formar H<sub>2</sub> en el cátodo. Finalmente se obtiene hidrógeno verde que podrá ser almacenado en contenedores.



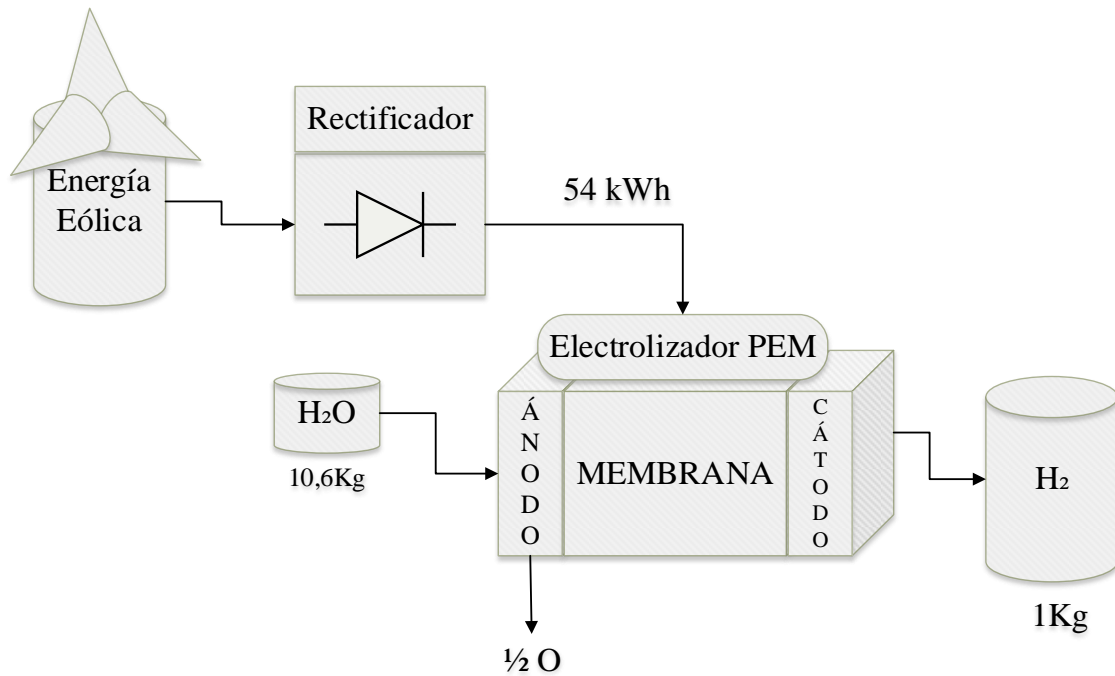


Ilustración 7 - Esquema de funcionamiento para la producción de hidrógeno (Autor).

Según las pruebas realizadas con un electrolizador PEM con capacidad de 900 kW se tiene una demanda de energía eléctrica de CC de 54 kWh por cada kg de hidrógeno producido (Hinkley, Hayward, McNaughton, & Gillespie, 2016); este proceso tiene un requerimiento de agua de 10,6 kg (Mohsin, Rasheed, & Saidur, 2018) (Ayodele & Munda, 2019). Mediante la Ecuación 8 y utilizando los valores sugeridos de este sistema se puede calcular el hidrógeno que se obtendrá en el proyecto eólico.

$$H_2 = \frac{E * n}{Ee}$$

Ecuación 9 -Producción de hidrógeno mediante electrolizador.

Donde:

$E$ : es la energía eléctrica consumida kWh

$n$ : es la eficiencia del rectificador (90 %)

$Ee$ : es la demanda de energía del electrolizador, que se obtuvo de 54 kWh/kg de hidrógeno

Para el caso de estudio se toma de referencian un rectificador con una eficiencia de 90% para la producción de hidrógeno.

### 3. CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis de Resultados

##### 3.1.1. Distribución de probabilidad de Weibull

Mediante los datos reales del proyecto se utilizó distribución de probabilidad de Weibull para el modelamiento de la curva y el cálculo de los valores correspondientes. Como lo muestra la Ilustración 8 donde se representa el comportamiento de la curva.

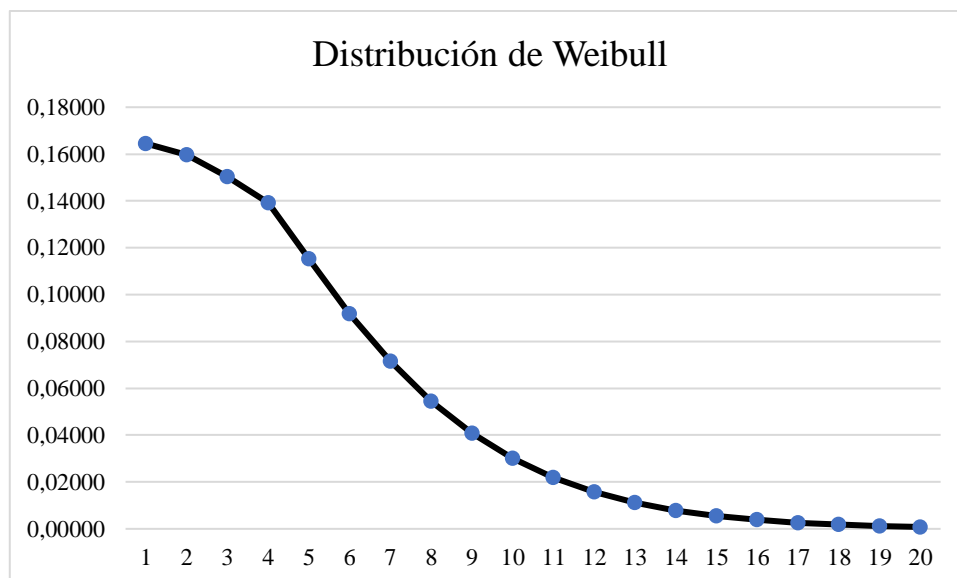


Ilustración 8 - Curva de la distribución de Weibull (Autor).

En la Tabla 3 se determina los valores calculados de la distribución de Weibull. Mediante la aplicación de la Ecuación 2 dentro del rango de velocidad y el número de horas al año de estos valores. (Ver [Anexo 5](#))

Velocidad (m/s)	Horas año	Función densidad de probabilidad de Weibull
1	1914	0,1645
2	1358	0,1597
2,5	386	0,1504
3	343	0,1393
4	695	0,1151
5	506	0,0919
6	471	0,0715
7	458	0,0544
8	501	0,0407
9	506	0,0300
10	470	0,0218
11	426	0,0157

<b>12</b>	311	0,0112
<b>13</b>	181	0,0079
<b>14</b>	111	0,0055
<b>15</b>	62	0,0038
<b>16</b>	38	0,0026
<b>17</b>	13	0,0018
<b>18</b>	8	0,0012
<b>19</b>	2	0,0008

Tabla 3 - Cálculo de la densidad de probabilidad de Weibull (Autor).

### 3.1.2. Distribución de probabilidad Beta

Con los datos reales del proyecto se utilizó distribución de probabilidad de Beta para el modelamiento de la curva y el cálculo de los valores correspondientes. Como lo muestra la Ilustración 9 donde se representa el comportamiento de la curva.

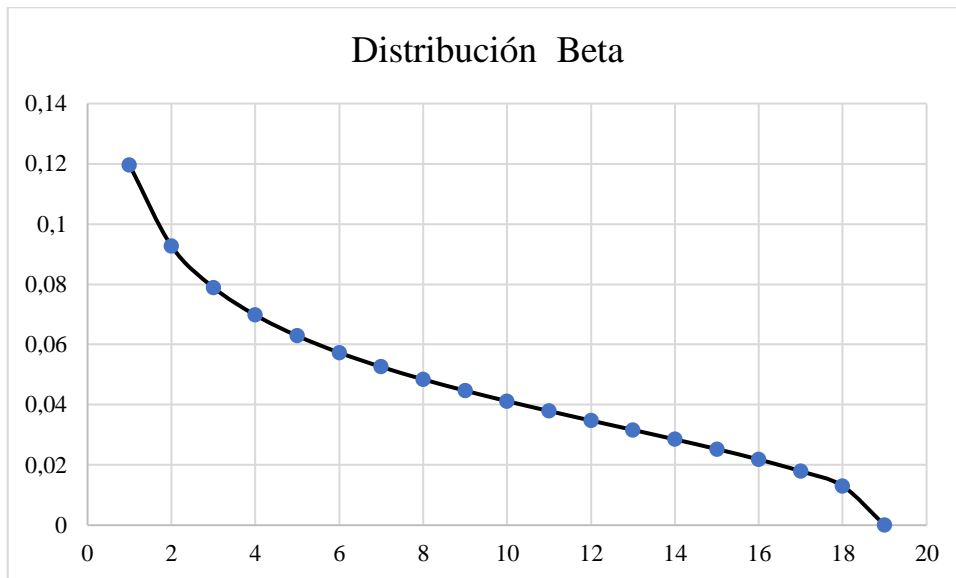


Ilustración 9 - Distribución de probabilidad beta (Autor).

En la Tabla 4 se determina los valores calculados de la distribución de probabilidad Beta con el rango de velocidad y el número de horas al año de estos valores. (Ver [Anexo 6](#)).

<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Horas año</b>	<b>Función de densidad de probabilidad Beta</b>
<b>1</b>	1914	0,1196
<b>2</b>	1358	0,0927
<b>2,5</b>	386	0,08450
<b>3</b>	343	0,0789
<b>4</b>	695	0,0698
<b>5</b>	506	0,0629
<b>6</b>	471	0,0573

<b>7</b>	458	0,0526
<b>8</b>	501	0,0484
<b>9</b>	506	0,0447
<b>10</b>	470	0,0412
<b>11</b>	426	0,0379
<b>12</b>	311	0,0347
<b>13</b>	181	0,0316
<b>14</b>	111	0,0285
<b>15</b>	62	0,0253
<b>16</b>	38	0,0218
<b>17</b>	13	0,0179
<b>18</b>	8	0,0130
<b>19</b>	2	0

Tabla 4 - Cálculo de la función de densidad de probabilidad Beta (Autor).

### 3.1.3. Generación eléctrica

#### 3.1.3.1. Método probabilístico

Utilizando la función de densidad de probabilidad Beta, se pudo calcular la potencia media de salida aplicando la Ecuación 6 donde se calcula un promedio de dos potencias y se multiplica por la función de densidad de probabilidad. Por otra parte, para calcular la energía anual que puede ser generada por el proyecto se utilizó la Ecuación 7 con la que se multiplica las potencias medias de salida que genera cada intervalo de velocidad por 8760 que es el total de horas del periodo de tiempo que se desea analizar. Los valores de potencia media de salida, acumulada y la energía anual acumulada se muestran en la Tabla 5.

Función de densidad de probabilidad	Potencia instantánea (kW)	Potencia media de salida (kW)	Potencia media de salida acumulada	Energía Anual acumulada (kWh)
0,120	0	0	0	0
0,093	0	0	0	0
0,085	25	1,06	1,06	9306,82
0,079	125	5,92	6,98	61171,39
0,070	300	14,83	21,81	191042,43
0,063	500	25,15	46,96	411335,33
0,057	800	37,24	84,20	737581,38
0,053	1230	53,36	137,56	1205012,12
0,048	1875	75,17	212,73	1863498,70
0,045	2730	102,84	315,57	2764385,59
0,041	3400	126,25	441,82	3870338,09
0,038	3570	132,11	573,93	5027602,17
0,035	3570	124,03	697,96	6114094,09

0,032	3570	112,91	810,87	7103202,50
0,028	3570	101,73	912,60	7994387,30
0,025	3570	90,19	1002,79	8784480,99
0,022	3570	77,85	1080,65	9466472,78
0,018	3570	63,91	1144,56	10026338,98
0,013	3570	46,32	1190,88	10432106,71
0,000	3570	0,00	1190,88	10432106,71

Tabla 5 – Método probabilístico (Autor).

$$\text{Energía Anual}(kWh) = 10432106,71$$

$$\text{Energía Anual}(MWh) = 10\,432,1$$

Para obtener el valor total de producción del proyecto se debe multiplicar la energía anual por 14 ya que es el número de aerogeneradores con los que cuenta el parque eólico tenido una producción total aproximado de 146 GWh al año energía eléctrica.

### 3.1.3.2.Método cronológico

Para este método se utiliza la velocidad media de los rangos de velocidades del año seleccionado (Ver [Anexo 4](#)). Para calcular la energía producida se aplica la Ecuación 8 que multiplica las horas año con la potencia instantánea del aerogenerador.

Velocidad (m/s)	Horas año	Frecuencia puntual	Frecuencia acumulada	Potencia instantánea (kW)	Energía producida (kWh)
0,5	1914	0,21849	0,21849	0	0
1,5	1358	0,15502	0,37352	0	0
2,25	386	0,04406	0,41758	25	9650
2,75	343	0,03916	0,45674	88	30184
3,5	695	0,07934	0,53607	210	145950
4,5	506	0,05776	0,59384	390	197340
5,5	471	0,05377	0,64760	630	296730
6,5	458	0,05228	0,69989	1000	458000
7,5	501	0,05719	0,75708	1500	751500
8,5	506	0,05776	0,81484	2260	1143560
9,5	470	0,05365	0,86849	3120	1466400
10,5	426	0,04863	0,91712	3570	1520820
11,5	311	0,03550	0,95263	3570	1110270
12,5	181	0,02066	0,97329	3570	646170
13,5	111	0,01267	0,98596	3570	396270
14,5	62	0,00708	0,99304	3570	221340
15,5	38	0,00434	0,99737	3570	135660
16,5	13	0,00148	0,99886	3570	46410
17,5	8	0,00091	0,99977	3570	28560
18,5	2	0,00022831	1	3570	7140

Tabla 6 – Método cronológico (Autor).

$$Energia\ Anual(kWh) = \sum Energia\ producida$$

*Ecuación 10 – Energía anual método cronológico.*

$$Energia\ Anual(kWh) = 8611954$$

Como se mencionó en la Sección 3.1.3.1 el valor de energía total del proyecto se obtiene multiplicando por 14 ya que es el número de aerogeneradores con los que cuenta el parque eólico teniendo una producción total aproximada de 120 GWh al año energía eléctrica.

### **3.1.4. Producción de hidrógeno**

Para poder estimar cuánto hidrógeno se puede producir con la energía suministrada del proyecto eólico Minas de Huascachaca se debe utilizar un electrolizador. Para el caso de estudio se seleccionó la tecnología PEM ya que tienen altas eficiencias y por ser las más prometedoras para la aplicación en la producción de H<sub>2</sub> verde. Según la literatura consultada para este cálculo se debe conocer los valores de la energía suministrada al electrolizador, la eficiencia y el consumo de energía por kilogramo producido. Para este cálculo se utilizó la Ecuación 9.

$$H_2 = \frac{120\ 567\ 356 * 0,9}{54}$$

$$H_2 = 2\ 009\ 455,93\ kg$$

### **3.1.5. Abastecimiento a vehículos eléctricos celda combustible de hidrógeno**

Realizando el análisis correspondiente de las capacidades de un VECC de hidrógeno se seleccionó el Hyundai NEXO mencionado en la Sección 1.8. Este vehículo cuenta con una autonomía de 666 km y la capacidad de almacenamiento de 6,7 kg de H<sub>2</sub> (Hyundai, 2018). Con el valor de producción de hidrógeno anual obtenido en la Sección 3.1.4. se realizó el cálculo de la cantidad de coches que se pueden abastecer en este periodo de tiempo. Para esto se dividió el total de la producción de H<sub>2</sub> por la capacidad de almacenamiento del vehículo, de esta manera se pudo estimar que se puede suministrar 299 919 coches con este gas.

### **3.1.6. Recorrido y autonomía del VECC**

Al estimar el recorrido total de los vehículos abastecidos con H<sub>2</sub> se multiplica el total de recargas por la autonomía del VECC. Con estos cálculos se obtiene un recorrido total de la flota vehicular de aproximadamente 199 745 918 km.

Por el estudio realizado de kilómetros-vehículo recorrido en la ciudad se tiene como media general de 36,04 km al día para un automóvil (Sarango & Moncayo , 2016). Para poder calcular la autonomía de un vehículo de celda de combustible de H<sub>2</sub> se debe dividir la autonomía del auto por el recorrido diario. De esta manera se puede predecir la autonomía media de 18 a 19 días que tiene los VECC con la carga completa de hidrógeno.

### **3.2.Discusión**

Uno de los problemas característicos de la ciudad de Cuenca es que tiene un 23% menos de disponibilidad de oxígeno en comparación con una ciudad al nivel del mar, ya que está ubicada a una altitud de 2550 m.s.n.m. aproximadamente. Esto ocasiona que los procesos de combustión sean menos eficientes y por lo tanto se generen más emisiones de gases contaminantes (EMOV, 2017). Naturalmente, esto también aplica a los vehículos de combustión interna que son los más usados en esta ciudad.

Mediante la red de equipos de análisis de gases que tiene la Empresa de Movilidad (EMOV EP) en la ciudad se pudo apreciar que una de las fuentes más representativas de contaminantes es el tráfico vehicular (EMOV-EP, 2016), siendo el CO<sub>2</sub> emitido por los coches a combustión interna el contaminante más notable en el aire de esta ciudad. Por lo que es un reto satisfacer las necesidades internas del transporte sin contaminar el ambiente de la ciudad. Por este motivo se debería fomentar el uso de vehículos de celda a combustible de hidrógeno con la finalidad de reducir el problema de los contaminantes atmosféricos y obtener grandes beneficios ambientales.

Según (Ramírez, 2005), a través de un estudio realizado en las Islas Canarias del modelamiento estadístico del viento para la producción de energía eólica, se determinó que la distribución de probabilidad Beta es la que mejor representa los datos de viento en comparación con la distribución de Weibull, con los datos de la estación Los Valles. En el caso de estudio del proyecto Minas de Huascachaca se tiene un comportamiento similar de las masas de aire haciendo que la distribución Beta sea la más idónea para predecir el comportamiento del viento. Si bien muchos autores como (Jimoh, Ayodele, Munda, & Agee, 2012) (Ayodele, Jimoh, Munda, & Agee, 2013) (Salazar Moreno, Fritz, Lopez, & Rojano, 2017) en la literatura especializada recomiendan el uso de la distribución de probabilidad de Weibull, esta distribución no es la más adecuada en todos los casos. Ya que el viento tiene un comportamiento diferente en cada zona, donde intervienen varios factores los cuales dan características únicas al sitio de estudio.

Se realizó los cálculos con los métodos probabilístico y cronológico para la producción de energía y de esta manera comparar con los datos del proyecto. Mediante los datos oficiales del proyecto eólico se espera una producción media anual de 130 GWh de energía eléctrica (ELECAUSTRO, 2022). Comparando esta producción con la obtenida usando la distribución de probabilidad beta se observa una diferencia de 12,35% en exceso. Es decir, los cálculos de este caso exceden en 16 GWh en el año a los valores oficiales del parque eólico. Por otra parte, aplicando el método cronológico se tiene una diferencia de -7,26% por lo tanto se obtiene 10 GWh menos que la esperada del proyecto. Estas diferencias pueden ser debido a varios factores. Lamentablemente, al no ser pública la metodología y los parámetros usados por ELECAUSTRO en la determinación de la energía media anual del proyecto, no se puede determinar en mayor detalle las causas de esta diferencia. Sin embargo, el valor determinado en este estudio estaría dentro de un porcentaje tolerable de semejanza.

Existe un estudio realizado en Sudáfrica de la viabilidad económica para la producción de hidrogeno, teniendo como fuente primaria la energía eólica. En este artículo se analizaron varios sitios con un gran potencial de producción, siendo el de Sutherland el más semejante al de esta investigación. Esta localidad se encuentra a una altitud de 1 583 m.s.n.m.; y se utilizó un aerogenerador de 3 MW modelo Alston. En esta publicación se reporta una generación de 159,9 toneladas de hidrógeno (Ayodele & Munda, 2019). Teniendo en consideración que el proyecto eólico Minas de Huascachaca posee 14 aerogeneradores, la producción de la investigación sudafricana tendrá una producción aproximada de 2 238,6 toneladas de H<sub>2</sub> anuales. Mediante una comparación de las dos investigaciones, se tiene una diferencia del 11% lo que significa 229,14 toneladas menos del proyecto eólico Minas de Huascachaca, teniendo este proyecto una producción 2009,46 toneladas.

Como se mencionó en la sección 3.1.5. la producción de hidrógeno anual obtenida por el proyecto eólico, podría abastecer a 299 919 recargas de vehículos de celda combustible en un periodo de un año. También se podría representar el suministro diario de 822 coches. Lo que al contrasta con el artículo realizado de la factibilidad de producción y operación de una estación de servicio de repostaje de H<sub>2</sub> en España. Se obtuvo que la producción de esta hidrogenera podría proveer de este gas a 200 vehículos en el transcurso de un día (Griñan, 2022). De esta manera se debería implementar de 4 a 5 estaciones para poder cumplir con la producción proyectada en esta investigación.



Para poder determinar el beneficio ambiental del uso de este tipo de tecnología se analizó un estudio de contaminación de coches a combustión interna realizado en la ciudad de Cuenca, en un auto estándar que tiene gran popularidad dentro del parque automotor. Produciendo emisiones de gases en un recorrido promedio de 18,6 km se obtuvo un valor de 96,8 gramos de CO<sub>2</sub> (Cajamarca & Cando, 2021); es decir 5,2 gramos de CO<sub>2</sub> por km recorrido. Con estos datos se estima cuánto dióxido de carbono se evitaría en la atmósfera dentro de un periodo de un año de producción de hidrógeno verde. Al multiplicar el valor anterior por el número de kilómetros que rinde el parque eólico a través del hidrógeno mencionado en la Sección 3.1.6., se tuvo un estimado de 1 039,54 toneladas de CO<sub>2</sub> al año que se pueden eliminar utilizando vehículos de celda combustible alimentados por el parque eólico Minas de Huascachaca.

Actualmente, las ciudades a nivel mundial consumen un 78% de la energía producida en el planeta, y generan el 60% de las emisiones de gases nocivos para el ambiente (ONU-Habitad, 2018). Según datos oficiales de (OMS, 2017), más del 25% de muertes de menores de 5 años son a causa de la contaminación ambiental y alrededor de 1,7 millones de niños fallecen por consecuencia de la mala calidad del aire de las ciudades donde viven. Asimismo, se cuantifica que más de 13 millones de personas mueren cada año por las condiciones del aire. Mediante un estudio realizado en el cantón Cuenca se calcula que el total de emisiones de vehículos a gasolina es de 450 040 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>. Teniendo una representación del 30% dentro de las fuentes más comunes de contaminación (CAF, AFD, & SASA, 2018). Por lo tanto, si se suma las emisiones evitadas por el proyecto eólico dadas por la empresa ELECAUSTRO y las del uso de VECC de hidrógeno, se tiene un aproximado de 77 664,5 toneladas anuales de dióxido de carbono que no serán emitidas a la atmósfera. Haciendo que se reduzca un 17,3% del total de las emisiones de vehículos a combustión interna. Es así que al utilizar estas tecnologías se mejora significativamente la calidad de aire en la ciudad.

## **4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. Conclusiones**

El presente trabajo cumple con el objetivo planteado de la evaluación del potencial eólico para la producción de hidrógeno verde mediante el uso de la energía eléctrica generada por el proyecto eólico minas de Huascachaca.

Al comparar los dos métodos: probabilístico y cronológico, se obtuvo mayor precisión en los valores calculados usando el segundo método.

Mediante el método cronológico se realizó el estudio de generación energética para la producción eléctrica, con la finalidad obtener la energía anual del proyecto con un estimado de 8 611,95 MWh de energía en un aerogenerador con un lapso tiempo de operación de un año.

Se calculó la producción de energía eléctrica del proyecto Minas de Huascachaca que posee 14 aerogeneradores. Con la energía obtenida se tuvo que hacer un cálculo para conseguir el total de producción del proyecto consiguiendo un valor de 120 GWh de energía renovable.

Tomando los datos de producción total de energía se pudo realizar este estudio para estimar la cantidad de H<sub>2</sub> que puede aportar el parque eólico. Teniendo una producción aproximada de 2 009,46 toneladas de este gas en un periodo de tiempo de un año.

Al transformar la energía generada del parque eólico en hidrógeno verde para el uso en autos de celda a combustible. Con un total de 299 919 recargas para VECC de H<sub>2</sub> en una fase de tiempo de un año. Siendo una nueva alternativa de combustible amigable con el medioambiente.

Se realizó la investigación del potencial para la producción de hidrógeno en el proyecto eólico Minas de Huascachaca para suministrar a vehículos de celda combustible con la finalidad de reducir 77 664,5 toneladas de emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera.

### **4.2.Recomendaciones**

Para comprobar la distribución correcta se debe ayudar mediante softwares que faciliten la comparación de curvas de datos reales y los simulados por estos programas con la finalidad de poder contrastar esta información.

Se debe impulsar este tipo de investigaciones de combustibles alternativos para poder descarbonizar la industria automotriz y así se conseguirá mejor calidad del ambiente.

Al potenciar más los proyectos eólicos en el país se conseguirá el aprovechamiento del viento para la producción de energías limpias y sustentables.

Se debería implementar estaciones de abastecimiento de hidrógeno para vehículos que utilicen este gas con la finalidad de impulsar esta tecnología y que sea más fácil de conseguir este servicio.

Mediante convenios internacionales fomentar el uso, desarrollo y consumo de vehículos eléctricos celda combustible de hidrógeno para el uso en el país.

Los gobiernos autónomos descentralizados y el gobierno central deben incentivar el desarrollo de proyectos amigables con el medio ambiente, para reducir los gases de efecto invernadero con la finalidad de frenar el cambio climático.

Impulsar a las industrias ecuatorianas para el desarrollo de VECC con el objetivo de producir o ensamblar estos vehículos en el país generando puestos de trabajo y actualizando la industria automotriz.

## Bibliografía

- Abdol Rahim, A., Tijani, A. S., Kamarudin, S., & Hanapi, S. (2016). An overview of polymer electrolyte membrane electrolyzer for hydrogen production: Modeling and mass transport. *Journal of Power Sources*, 56-65.
- Al-Sharafi, A., Sahin, A., Ayar, T., & Yilbas, B. (2017). Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33-49.
- Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, 350-377.
- Apostolou, D., & Enevoldsen, P. (2019). The past, present and potential of hydrogen as a multifunctional storage application for wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 917-929.
- ARC. (2022). *Panorama eléctrico*. Quito: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables.
- AREVA\_H2GEN. (06 de 03 de 2019). *PEM water electrolysis*. Obtenido de <http://www.arevah2gen.com/en/products-services/technology>
- Attig-Bahar, F., Ritschel, U., Akari, P., Abdeljelil, I., & Amairi, M. (2021). Wind energy deployment in Tunisia: Status, drivers, barriers and research gaps—A comprehensive review. *Energy Reports*, 7374-7389.
- Ayodele, T., & Munda, J. (2019). Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. *International Journal of Hydrogen Energy*, 17669-17687.
- Ayodele, T., Jimoh, A., Munda, J., & Agee, J. (2013). A Statistical Analysis of Wind Distribution and Wind Power Potential in the Coastal Region of South Africa. *International Journal of Green Energy*, 814-834.
- Baglio, V., Siracusano, S., Lufrano, F., Staiti, P., & Aricò, A. (2013). Electrochemical characterization of a PEM water electrolyzer based on a sulfonated polysulfone membrane. *Journal of Membrane Science*, 209-214.
- Baldacchino, D., Ferreira, C., Tavernier, D., Timmer, W., & Bussel, G. (2018). Experimental parameter study for passive vortex generators on a 30% thick airfoil. *Wind Energy*, 745 - 765 .
- Barbarias, I., Lopez, G., Artetxe, M., Arregi, A., Bilbao, J., & Olazar, M. (2018). Valorisation of different waste plastics by pyrolysis and in-line catalytic steam reforming for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 575-584.
- Bludszuweit, H., Dominguez-Navarro, J., & Llombart, A. (2008). Statistical Analysis of Wind Power Forecast Error. *IEEE Transactions on Power Systems*, 983-991.

- Bruce, C. (17 de Agosto de 2021). *BMW iX5 Hydrogen Will Show Off Brand's Fuel Cell Tech In Munich*. Obtenido de <https://www.motor1.com/news/527166/bmw-ix5-hydrogen-crossover-debut/>
- Bruninx, K., & Delarue, E. (2014). A Statistical Description of the Error on Wind Power Forecasts for Probabilistic Reserve Sizing. *IEEE*, 995-1002.
- Burnat, D., Schlupp, M., Wichser, A., Lothenbach, B., Gorbar, M., Züttel, A., & Vogt, U. (2015). Composite membranes for alkaline electrolysis based on polysulfone and mineral fillers. *Journal of Power Sources*, 163-172.
- CAF, AFD, & SASA. (2018). *Proyecto huella de ciudades*. Cuenca.
- Cajamarca, P., & Cando, L. (2021). *Propuesta de la metodología para la estimación de emisiones contaminantes para los vehículos Kia sportage y Chevrolet aveo, basados en datos de la revisión técnica vehicular de la ciudad de Cuenca*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Carmo, M., Fritz, D., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4901-4934.
- Chen, C., Tiong, S., Tan, J., Koh, S., & Fong, Y. (2018). Retracted: Online support vector based gas emission prediction system for generation power plant. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 472.
- Cho, S.-H., Lee, S., Jung, S., & Park, Y.-K. (2019). Carbon dioxide-cofeeding pyrolysis of pine sawdust over nickle-based catalyst for hydrogen production. *Energy Conversion and Management* 201.
- CIE. (30 de 03 de 2021). *Energía Eólica*. Obtenido de <http://energia.org.ec/cie/energia-eolica-2/>
- Cochancela, J., & Astudillo, P. (2012). Análisis energético de centrales eólicas. *Repositorios latinoamericanos*.
- Cong, T., Raj, A., Chanaphet, J., Mohammed, S., Ibrahim, S., & Shoaibi, A. (2016). A detailed reaction mechanism for hydrogen production via hydrogen sulphide (H<sub>2</sub>S) thermolysis and oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 6662-6675.
- Creus Solé, A. (2008). *Aerogeneradores*. Barcelona: Cano Pina.
- Crotogino, F. (2016). Chapter 20 - Larger Scale Hydrogen Storage. *Storing Energy*, 411-429.
- CrystalBall. (18 de 04 de 2013). *Distribución beta*. Obtenido de [https://www.crystalballservices.com/Portals/0/CB\\_Material/CrystalBallUserGuides/es/Crystal%20Ball%20Users%20Guide/frameset.htm?beta\\_distribution.htm](https://www.crystalballservices.com/Portals/0/CB_Material/CrystalBallUserGuides/es/Crystal%20Ball%20Users%20Guide/frameset.htm?beta_distribution.htm)
- Douak, M., & Settou, N. (2015). Estimation of Hydrogen Production Using Wind Energy in Algeria. *Energy Procedia*, 981-990.

- Durakovic, A. (20 de Agosto de 2021). *Off Shore Wind* . Obtenido de <https://www.offshorewind.biz/2021/08/20/mingyang-launches-16-mw-offshore-wind-turbine/>
- Ehret, O., & Bonhoff, K. (2015). Hydrogen as a fuel and energy storage: Success factors for the German Energiewende. *International Journal of Hydrogen Energy*, 5526-5533.
- ELECAUSTRO. (2022). *Proyecto Eólico Minas de Huascachaca (PEMH)*. Obtenido de <https://www.elecaustro.gob.ec/proyectos/proyecto-eolico-minas-de-huascachaca/>
- EMOV. (2017). *Informe de calidad aire Cuenca 2017*. Cuenca: EMOV EP.
- EMOV-EP. (21 de 12 de 2016). *Inventario de emisiones atmosféricas del canton Cuenca 2014*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/311789933\\_Inventario\\_de\\_Emisiones\\_Atmosfericas\\_del\\_Canton\\_Cuenca\\_2014](https://www.researchgate.net/publication/311789933_Inventario_de_Emisiones_Atmosfericas_del_Canton_Cuenca_2014)
- Godula-Jopek, A. (2015). Hydrogen Storage Options Including Constraints and Challenges. *Hydrogen Production*, 273-310.
- Griñan, G. G. (2022). *Análisis energético y económico de una estación de servicio de hidrógeno*. Universidad de Navarra, Donostia-San Sebastián.
- Hames, Y., Kaya, K., Baltacioglu, E., & Turksoy, A. (2018). Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10810-10821.
- Hinkley, J., Hayward, J., McNaughton, R., & Gillespie, R. (2016). *Cost assessment of hydrogen production from PV and electrolysis*. CSIRO: Report to ARENA as part of Solar Fuels Roadmap.
- Holladay, J., Hu, J., King, D., & Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 244-260.
- Hwang, G.-J., Lim, S.-G., Bong, S.-Y., Ryu, C.-H., & Choi, H.-S. (2015). Preparation of anion exchange membrane using polyvinyl chloride (PVC) for alkaline water electrolysis. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 1896-1901.
- Hyundai. (06 de 03 de 2018). *Hyundai NEXO de pila de combustible*. Obtenido de <https://www.hyundai.com/es/modelos/nexo.html>
- IEA. (20 de 07 de 2020). *International Energy Agency, Data and Statistics*. Obtenido de [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20\(TPES\)%20by%20source](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20(TPES)%20by%20source)
- Ishaq, H., Dincer, I., & Naterer, G. (2018). Performance investigation of an integrated wind energy system for co-generation of power and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 9153-9164.

- ITM. (2022). *3MEP CUBE / ITM Power*. Obtenido de Nuxt\_Tailwind\_Boiler\_Plate: <https://itm-power.com/products/3-mep-cube>
- Ito, H., Maeda, T., Nakano, A., Kato, A., & Yoshida, T. (2013). Influence of pore structural properties of current collectors on the performance of proton exchange membrane electrolyzer. *Electrochimica Acta*, 242-248.
- Jannati, J., & Nazarpour, D. (2017). Optimal energy management of the smart parking lot under demand response program in the presence of the electrolyser and fuel cell as hydrogen storage system. *Energy Conversion and Management*, 659-669.
- Jensen, W., & Alexander, M. (2016). Statistics for Engineering and the Sciences. *Journal of Quality Technology*, 297-299.
- Jia, L., Tan, Z., Kang, M., & Zhang, Z. (2014). Experimental investigation on dynamic characteristics of proton exchange membrane fuel cells at subzero temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11120-11127.
- Jimoh, A., Ayodele, T., Munda, J., & Agee, J. (2012). Wind distribution and capacity factor estimation for wind turbines in the coastal region of South Africa. *Energy Conversion and Management*, 614-625.
- Kane, M. (26 de 02 de 2018). *There Are 6,500 Hydrogen Fuel Cell Cars Worldwide (Half In California)*. Obtenido de <https://insideevs.com/news/336564/there-are-6500-hydrogen-fuel-cell-cars-worldwide-half-in-california/>
- Khanmohammadi, S., Saadat-Targhi, M., Waly Ahmed, F., & Afrand, M. (2020). Potential of thermoelectric waste heat recovery in a combined geothermal, fuel cell and organic Rankine flash cycle (thermodynamic and economic evaluation). *International Journal of Hydrogen Energy*, 6934-6948.
- Khorramdel, B., Zare, A., Chung, C., & Gavriliadis, P. (2020). A Generic Convex Model for a Chance-Constrained Look-Ahead Economic Dispatch Problem Incorporating an Efficient Wind Power Distribution Modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 873-886.
- Kokoh, K., Mayousse, E., Napporn, T., Servat, K., Guillet, N., Soye, E., . . . Paul-Joseph, J. (2014). Efficient multi-metallic anode catalysts in a PEM water electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1924-1931.
- Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 442-454.
- Kumar, S., Ramakrishna, S., D. Srinivasulu, R., Bhagawan, D., & Himabindu, V. (2017). Synthesis of Polysulfone and zirconium oxide coated asbestos composite separators for alkaline water electrolysis. *Science Medic Central*, 1-6.
- Langemann, M., Fritz, D., Müller, M., & Stolten, D. (2015). Validation and characterization of suitable materials for bipolar plates in PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11385-11391.
- Lehner, M., Tichler, R., Steinmüller, H., & Koppe, M. (2014). *Power-to-Gas: Technology and Business Models*. Linz: Springer Briefs in Energy.

- Lin, R.-H., Zhao, Y.-Y., & Wu, B.-D. (2020). Toward a hydrogen society: Hydrogen and smart grid integration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 20164-20175.
- Liu, X. (2010). Impact of beta distributed wind power on emission mitigation dispatch. *IEEE PES General Meeting*.
- Lonis, F., Tola, V., & Cau, G. (2021). Assessment of integrated energy systems for the production and use of renewable methanol by water electrolysis and CO<sub>2</sub>. *Fuel*, 119160.
- Luo, Y., & Jiao, K. (2018). Cold start of proton exchange membrane fuel cell. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29-61.
- Luo, Y., Nie, Q., Yang, D., & Zhou, B. (2021). Robust Optimal Operation of Active Distribution Network Based on Minimum Confidence Interval of Distributed Energy Beta Distribution. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 423-430.
- Lux, B., & Pfluger, B. (2020). A supply curve of electricity-based hydrogen in a decarbonized European energy system in 2050. *Applied Energy*.
- Mahmoud, M., Ramadan, M., Naher, S., & Pullen, K. (2021). A review of geothermal energy-driven hydrogen production systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, 100854.
- Makridis, S. (2016). Hydrogen storage and compression. En *Methane and hydrogen for energy storage*, Institution of Engineering and Technology (págs. 1-28). Agrinio: Ting Carriveau.
- Marini, S., Salvi, P., Nelli, P., Pesenti, R., Villa, M., & Berrettoni, M. (2012). Advanced alkaline water electrolysis. *Electrochimica Acta*, 384-391.
- Marinkas, A., Strużyńska-Piron, I., Lee, Y., Lim, A., Park, H., Jang, J., & Kim, H.-J. (2018). Anion-conductive membranes based on 2-mesitylbenzimidazolium functionalised poly-(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) and their use in alkaline water electrolysis. *Polymer*, 242-251.
- Marshall, A., Børresen, B., Hagen, G., Tsympkin, M., & Tunold, R. (2007). Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers—Reduced energy consumption by improved electrocatalysis. *Energy*, 431-436.
- Martinez, J., Flaszynski, P., & Doerffer, P. (2018). Application of rod vortex generators for flow separation reduction on wind turbine rotor. *Wind Energy*, 1202 - 1215.
- MathWorks. (2022). *Hydrogen fuel cells significantly reduce CO<sub>2</sub> emissions in commercial vehicles*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/company/mathworks-stories/reducing-commercial-vehicle-emissions-using-hydrogen-fuel-cells.html>
- MEM. (02 de Septiembre de 2021). 80% de avance presenta Minas de Huascachaca, el proyecto eólico más grande del Ecuador. Loja, Loja, Ecuador.



- MERNRR. (30 de Noviembre de 2020). Gobierno nacional adjudicará proyectos de generación eólico Villonaco II, III y fotovoltaico el Aromo. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Minitab. (12 de 03 de 2018). *Soporte Minitab 18*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/the-anderson-darling-statistic/#:~:text=El%20estad%C3%ADstico%20Anderson%20Darling%20mid e,datos%2C%20menor%20ser%C3%A1%20este%20estad%C3%A>
- Miranda , P., Carreira, E., Icardi, U., & Nunes, G. (2017). Brazilian hybrid electric-hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13949-13959.
- Mohsin, M., Rasheed, A., & Saidur, R. (2018). Economic viability and production capacity of wind generated renewable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2621-2630.
- Mostafaeipour, A., & Abesi, S. (2015). Wind Turbine Productivity and Development in Iran. *IEEE*.
- Nguyen, T., Abdin, Z., Holm, T., & Merida, W. (2019). Grid-connected hydrogen production via large-scale water electrolysis. *Energy Conversion and Management*, 112108.
- Nicoletti, G., Arcuri, N., Nicoletti, G., & Bruno, R. (2015). A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Conversion and Management*, 205-213.
- Nie, J., & Chen, Y. (2010). Numerical modeling of three-dimensional two-phase gas-liquid flow in the flow field plate of a PEM electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3183-3197.
- Nojavan, S., Zare, K., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2017). Application of fuel cell and electrolyzer as hydrogen energy storage system in energy management of electricity energy retailer in the presence of the renewable energy sources and plug-in electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 404-41.
- Olateju, B., Kumar, A., & Secanell, M. (2016). A techno-economic assessment of large scale wind-hydrogen production with energy storage in Western Canada. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8755-8776.
- OMS. (2017). *OMS alerta de la muerte anual de 1,7 millones de niños debido a la contaminación ambiental*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/oms-alerta-de-la-muerte-anual-de-17-millones-de-ni%C3%B1os-debido-la-contaminaci%C3%B3n>
- ONU. (2015). *La promesa de la energía solar: Estrategia energética para reducir las emisiones de carbono en el siglo XXI*. Obtenido de United Nations: <https://www.un.org/es/chronicle/article/la-promesa-de-la-energia-solar-estrategia-energetica-para-reducir-las-emisiones-de-carbono-en-el>

- ONU-Habitad. (2018). *Las ciudades y la contaminación contribuyen al cambio climático*. Obtenido de United Nations: <https://www.un.org/es/climate-change/climate-solutions/cities-pollution>
- Ordoñez, I. I., & Espinoza, J. L. (2019). *Estudio preliminar de un parque eólico complementario en Ecuador: caso Pimo provincia del Azuay*. Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Orozco, A. (2018). *Informe Parques Eolicos en Ecuador*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Prátula, H., Petris, D., Guillermo, E., Rossi, A., & Bocero, R. (2009). Optimización en la elección del aerogenerador y del método de evaluación de vientos en la región de bahía blanca. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.
- Ramírez, P. (2005). *Modelado estadístico de las características del viento para su evaluación energética. Aplicación a las islas Canarias*. Universidad de las palmas de gran Canaria, Las Palmas .
- Rezaei, M., Mostafaeipour, A., Moftakharzadeh, A., Qolipour, M., & Salimi, M. (2019). Evaluation of hydrogen production by wind energy for agricultural and industrial sectors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 7983 - 7995.
- Rezaei-Shouroki, M., Mostafaeipour, A., & Qolipour, M. (2017). Prioritizing of wind farm locations for hydrogen production: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 9500-9510.
- Roberts, R., Wang, Z., & Naterer, G. (2012). Comparison of thermochemical, electrolytic, photoelectrolytic and photochemical solar-to-hydrogen production technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 16287-16301.
- Robledo, C., Oldenbroek, V., Abbruzzese, F., & Van Wijk, A. (2018). Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and a residential building. *Applied Energy*, 615-629.
- Robledo, C., Poorte, M., Mathijssen, H., Van der Veen, R., & Van Wijk, A. (2019). Fuel Cell Electric Vehicle-to-Grid Feasibility: A Technical Analysis of Aggregated Units Offering Frequency Reserves. *Springer International*, 167-194.
- Saenz-Aguirre, A., Fernandez-Gamiz, U., Zulueta, E., Aramendia, I., & Teso-Fz-Betono, D. (2020). Flow control based 5 MW wind turbine enhanced energy production for hydrogen generation cost reduction. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Salazar Moreno, R., Fritz, E., Lopez, I., & Rojano, A. (2017). Confiabilidad y Análisis de Fallas utilizando la Distribución Weibull. *Sexto congreso internacional de investigación en ciencias básicas y agronómicas 21 y 22 de septiembre de 2017* (págs. 5 - 16). Chapingo: INGENIERÍA Y MATEMÁTICAS APLICADAS.

- Sandeep, K., Kamath, S., Mistry, K., Kumar M, A., Bhattacharya, S., Bhanja, K., & Mohan, S. (2017). Experimental studies and modeling of advanced alkaline water electrolyser with porous nickel electrodes for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 12094-12103.
- Sarango , D. A., & Moncayo , P. A. (2016). *Determinación del indicador kilómetros-vehículo recorrido (KVR) para la ciudad de Cuenca*. Universidad Politécnica Salesiana , Cuenca.
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., & Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30470-30492.
- Seetharaman, S., Balaji, R., Ramya, K., Dhathathreyan, K., & Velan, M. (2013). Graphene oxide modified non-noble metal electrode for alkaline anion exchange membrane water electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 14934-14942.
- Siracusano, S., Baglio, V., Briguglio, N., Brunaccini, G., Di Blasi, A., Stassi, A., . . . Aricò, A. (2012). An electrochemical study of a PEM stack for water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1939-1946.
- Smith, C. (06 de Septiembre de 2021). *BMW Shows iX5 Hydrogen Fuel Cell SUV Amid Sea Of BEVs In Munich*. Obtenido de <https://www.motor1.com/news/531286/bmw-ix5-hydrogen-munich/>
- Söder, L., Tómasson, E., Estanqueiro, A., Flynn, D., Hodge, B.-M., Kiviluoma, J., & Korpås, M. (2020). Review of wind generation within adequacy calculations and capacity markets for different power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109540.
- Sorgulu, F., & Dincer, I. (2018). A renewable source based hydrogen energy system for residential applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 5842-5851.
- Stojic, D., Grozdić, T., Umićević, B., & Maksić, A. (2008). A comparison of alkaline and proton exchange membrane electrolyzers. *Russian Journal of Physical Chemistry A, Focus on Chemistry*, 1958-1960.
- Tajiri, K., Tabuchi, Y., & Wang, C.-Y. (2007). Isothermal Cold Start of Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 154.
- Tamboreno, J. (1994). *Fiabilidad: la distribución de Weibull*. Barcelona: CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO.
- Toyota. (30 de 03 de 2021). *2021 MIRAI*. Obtenido de <https://www.toyota.com/mirai/>
- U.S.-Departament-Energy. (14 de 05 de 2020). *Energy efficiency & renewable energy*. Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- UPME. (2003). *Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión*. Bogotá: UNIDAD DE PLANIFICACION MINERO ENERGÉTICO.

- Vélez, V. (2016). *Informe de estado de centrales y proyectos de generación con energía renovable*. Quito: ELECGALAPAGOS.
- Villarrubia, M. (2007). *ENERGIA EOLICA*. Barcelona: CEAC.
- Wajda, T., & Kamiel, G. (2019). Thermolysis reactor scale-up for pilot scale Cusingle bondCl hybrid hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 9779-9790.
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN.
- Wang, H.-F., Sung, M.-P., & Hsu, H.-W. (2016). Complementarity and substitution of renewable energy in target year energy supply-mix plannin—in the case of Taiwan. *Energy Policy*, 172-182.
- Wilberforce, T., El-Hassan, Z., Khatib, F., Al Makky, A., Baroutaji, A., Carton, J., & Olabi, A. (2017). Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. *International Journal of Hydrogen Energy*, 25695-25734.
- Yang, Y., Solgaard, H., & Haider, W. (2016). Wind, hydro or mixed renewable energy source: Preference for electricity products when the share of renewable energy increases. *Energy Policy*, 521-531.
- Yao, L., Ma, F., Peng, J., Zhang, J., Zhang, Y., & Shi, J. (2020). Analysis of the failure modes in the polymer electrolyte fuel cell cold-start process—anode dehydration or cathode pore blockage. *Energies*, 256.
- Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 307-326.
- Zhang, C., Greenblatt, J., Wei, M., Eichman, J., Saxena, S., Muratori, M., & Guerra, O. (2020). Flexible grid-based electrolysis hydrogen production for fuel cell vehicles reduces costs and greenhouse gas emissions. *Applied Energy*, 115651.

## 5. ANEXOS

### 5.1. Anexo 1



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
<b>Datos Generales</b>		<b>Palas</b>	
Potencia nominal	3,570 MW	Longitud	72,5 m
Clase de viento	IEC S	Perfil	DEC
Control	Pitch y velocidad variable	Material	GFRP "Glass Fiber Reinforced Plastics"
Temperatura operativa estándar	Rango desde -10°C a +40°C	<b>Torre</b>	
<b>Rotor</b>		Tipo	Torre Tubular tipo cono
Diámetro	148 m	Altura	90 m
Área de barrido	17.203 m <sup>2</sup>	<b>Generador</b>	
Velocidad de giro	5,8 - 12,375 rpm	Tipo	Direct-Drive
Altura del cubo	90 m	Tensión	690 v
		Frecuencia	8,4 Hz
		Clase de protección	IP 54
		Factor de potencia	0,95

Ilustración 10 - Ficha técnica de aerogeneradores (ARC, 2022).

## 5.2.Anexo 2

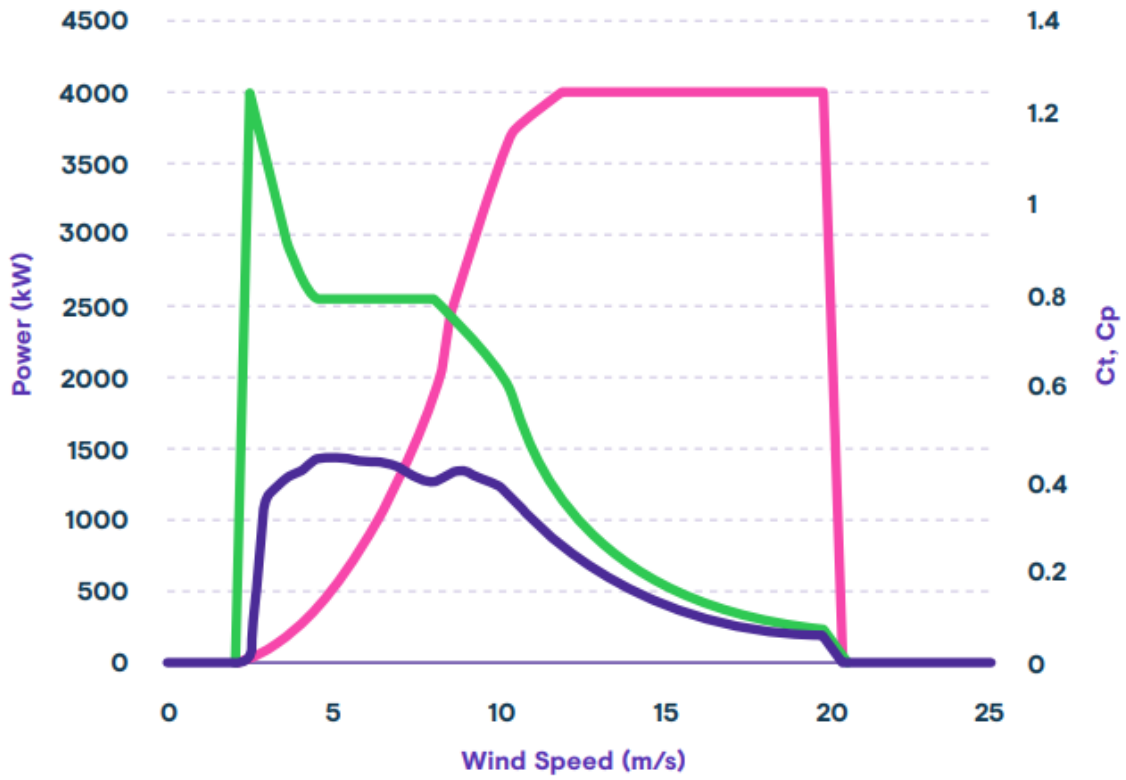


Ilustración 11 - Curva de potencia del aerogenerador  $C_t$  y  $C_p$ . (ARC, 2022)

### 5.3. Anexo 3

#### Deducción de la ecuación de regresión lineal

Para la determinación de la ecuación de regresión se utiliza la ecuación de la distribución de probabilidad acumulativa de Weibull (Cochancela & Astudillo , 2012). Para esta deducción se utiliza la Ecuación 3.

$$f(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)$$

$$\exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) = 1 - f(v)$$

$$\frac{1}{\exp\left(\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)} = 1 - f(v)$$

$$\frac{1}{1 - f(v)} = \exp\left(\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)$$

Se aplica el doble logaritmo neperiano:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - f(v)}\right)\right) = \ln\left(\ln\left(\exp\left(\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)\right)\right)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - f(v)}\right)\right) = \ln\left(\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)$$

Mediante la propiedad exponencial de los logaritmos:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - f(v)}\right)\right) = k \cdot \ln\left(\frac{v}{c}\right)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - f(v)}\right)\right) = k \cdot \ln(v) - k \cdot \ln(c)$$

La ecuación lineal está representada de la forma:

$$y = kx - b$$

Por lo tanto, la recta de regresión para la distribución de Weibull tiene las siguientes relaciones:

$$y = \text{Ln}\left(\text{Ln}\left(\frac{1}{1-f(v)}\right)\right), \quad x = \text{Ln}(v), \quad b = -k \cdot \text{Ln}(C)$$

Para el cálculo del parámetro de forma  $k$  y el intercepto  $b$ , se debe aplicar las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum(x - \bar{x})^2}$$

$$k = \frac{18,222}{13,922}$$

$$k = 1,294$$

$$b = \bar{y} - kx$$

$$b = -2,01$$

Donde:

$\bar{x}$ : es la media de los valores de  $x$

$\bar{y}$ : es la media de los valores de  $y$

Para el cálculo del parámetro  $C$  el cual está en función de  $b$  se despeja de la siguiente manera:

$$b = -k * \text{Ln}(C)$$

$$-\frac{b}{k} = \text{Ln}(C)$$

$$\exp\left(\frac{-b}{k}\right) = \exp(\text{Ln}(C))$$

$$C = \exp\left(\frac{-b}{k}\right)$$

$$C = 4,729$$



5.4.Anexo 4

**2017**

<b>Rango de Velocidad</b>	<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>	<b>Noviembre</b>	<b>Diciembre</b>
<b>0 - 1</b>	195	167	239	177	219	115	38	110	137	158	194	165
<b>1 - 2</b>	75	96	123	92	112	138	65	138	116	138	147	118
<b>2 - 2,5</b>	30	17	31	33	34	53	33	35	38	24	27	31
<b>2,5 - 3</b>	21	24	25	30	31	44	22	29	32	31	20	34
<b>3 - 4</b>	80	67	51	70	63	66	47	58	38	52	38	65
<b>4 - 5</b>	44	37	45	55	50	46	31	28	52	39	25	54
<b>5 - 6</b>	54	48	45	47	34	45	30	46	26	33	26	37
<b>6 - 7</b>	62	40	51	39	48	31	31	40	32	29	27	28
<b>7 - 8</b>	68	44	48	47	46	37	40	33	31	32	28	47
<b>8 - 9</b>	31	50	47	48	39	34	49	52	43	39	36	38
<b>9 - 10</b>	24	41	28	36	26	35	64	50	50	40	39	37
<b>10 - 11</b>	25	23	7	17	23	34	79	62	52	45	23	36
<b>11 - 12</b>	20	13	4	17	14	28	52	31	39	43	29	21
<b>12 - 13</b>	12	4	0	10	4	11	48	17	22	19	18	16
<b>13 - 14</b>	3	1	0	2	1	3	37	8	12	15	15	14
<b>14 - 15</b>	0	0	0	0	0	0	36	3	0	7	13	3
<b>15 - 16</b>	0	0	0	0	0	0	24	4	0	0	10	0
<b>16 - 17</b>	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	4	0
<b>17 - 18</b>	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	1	0
<b>18 - 19</b>	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
<b>19 - 20</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>744</b>	<b>672</b>	<b>744</b>	<b>720</b>	<b>744</b>	<b>720</b>	<b>744</b>	<b>744</b>	<b>720</b>	<b>744</b>	<b>720</b>	<b>744</b>
										<b>Total, de datos</b>		<b>8760</b>

Tabla 7 - Selección de datos del año 2017 (Autor).

5.5.Anexo 5

Velocidad (m/s)	Horas año	Frecuencia puntual	Frecuencia acumulada	X	Y	(X- Xmedia)	(Y- Ymedia)	(X-Xmedia) *(Y- Ymedia)	(X- Xmedia) <sup>2</sup>	v/c	(v/c) <sup>k</sup>
1	1914	0,21849	0,21849	0,00000	-1,40027	-2,01281	-2,05572	4,13778	4,05140	0,22450	0,15153
2	1358	0,15502	0,37352	0,69315	-0,76007	-1,31966	-1,41553	1,86802	1,74151	0,44900	0,36370
2,5	386	0,04406	0,41758	0,91629	-0,61514	-1,09652	-1,27060	1,39324	1,20235	0,56124	0,48211
3	343	0,03916	0,45674	1,09861	-0,49404	-0,91420	-1,14949	1,05086	0,83576	0,67349	0,60697
4	695	0,07934	0,53607	1,38629	-0,26393	-0,62651	-0,91939	0,57601	0,39252	0,89799	0,87293
5	506	0,05776	0,59384	1,60944	-0,10425	-0,40337	-0,75971	0,30645	0,16271	1,12249	1,15714
6	471	0,05377	0,64760	1,79176	0,04210	-0,22105	-0,61336	0,13558	0,04886	1,34699	1,45681
7	458	0,05228	0,69989	1,94591	0,18531	-0,06690	-0,47015	0,03145	0,00448	1,57148	1,76996
8	501	0,05719	0,75708	2,07944	0,34714	0,06663	-0,30832	-0,02054	0,00444	1,79598	2,09515
9	506	0,05776	0,81484	2,19722	0,52268	0,18442	-0,13278	-0,02449	0,03401	2,02048	2,43123
10	470	0,05365	0,86849	2,30259	0,70739	0,28978	0,05194	0,01505	0,08397	2,24498	2,77730
11	426	0,04863	0,91712	2,39790	0,91244	0,38509	0,25699	0,09896	0,14829	2,46948	3,13262
12	311	0,03550	0,95263	2,48491	1,11503	0,47210	0,45958	0,21697	0,22288	2,69397	3,49654
13	181	0,02066	0,97329	2,56495	1,28720	0,55214	0,63174	0,34881	0,30486	2,91847	3,86854
14	111	0,01267	0,98596	2,63906	1,45062	0,62625	0,79516	0,49797	0,39219	3,14297	4,24816
15	62	0,00708	0,99304	2,70805	1,60283	0,69524	0,94737	0,65865	0,48336	3,36747	4,63498
16	38	0,00434	0,99737	2,77259	1,78212	0,75978	1,12666	0,85602	0,57727	3,59196	5,02865
17	13	0,00148	0,99886	2,83321	1,91329	0,82040	1,25784	1,03193	0,67306	3,81646	5,42885
18	8	0,00091	0,99977	2,89037	2,12642	0,87756	1,47096	1,29086	0,77012	4,04096	5,83530
19	2	0,00023	1,00000	2,94444	2,75227	0,93163	2,09682	1,95346	0,86793	4,26546	6,24774

Tabla 8 - Cálculo de las variables para la distribución de probabilidad Weibull (Autor).

5.6.Anexo 6

Velocidad (m/s)	Horas año	Frecuencia puntual	Frecuencia acumulada	Función de densidad de probabilidad Beta	Potencia instantánea (kW)	Potencia media de salida (kW)	Potencia media de salida acumulada
1	1914	0,21849	0,21849	0,11961	0	0	0
2	1358	0,15502	0,37352	0,09272	0	0	0
2,5	386	0,04406	0,41758	0,08499	25	1,0624	1,0624
3	343	0,03916	0,45674	0,07894	125	5,9206	6,9830
4	695	0,07934	0,53607	0,06977	300	14,8255	21,8085
5	506	0,05776	0,59384	0,06287	500	25,1476	46,9561
6	471	0,05377	0,64760	0,05730	800	37,2427	84,1988
7	458	0,05228	0,69989	0,05257	1230	53,3597	137,5585
8	501	0,05719	0,75708	0,04842	1875	75,1697	212,7282
9	506	0,05776	0,81484	0,04466	2730	102,8410	315,5691
10	470	0,05365	0,86849	0,04119	3400	126,2503	441,8194
11	426	0,04863	0,91712	0,03791	3570	132,1078	573,9272
12	311	0,03550	0,95263	0,03474	3570	124,0288	697,9559
13	181	0,02066	0,97329	0,03163	3570	112,9119	810,8679
14	111	0,01267	0,98596	0,02850	3570	101,7334	912,6013
15	62	0,00708	0,99304	0,02526	3570	90,1933	1002,7946
16	38	0,00434	0,99737	0,02181	3570	77,8529	1080,6476
17	13	0,00148	0,99886	0,01790	3570	63,9117	1144,5592
18	8	0,00091	0,99977	0,01297	3570	46,3205	1190,8798
19	2	0,00022831	1	0,00000	3570	0,0000	1190,8798

*Tabla 9 - Cálculo de las variables para la distribución de probabilidad Beta (Autor).*