



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad al servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“Simulación dinámica de sistema híbrido Eólico y Pila-
Combustible por Simulink/Matlab y validación de datos para una
vivienda Tipo de hasta 2000 Wh”**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: CRISTHIAN ANDRÉS CANGO JAPÓN

DIRECTOR: DR. SAMUEL SAMI-HOWARD

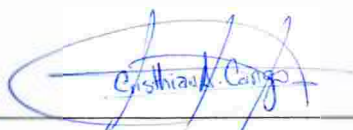
CUENCA

2018

DECLARACIÓN

Yo, Cristhian Andrés Cango Japón, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento; y eximo expresamente a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

La Universidad Católica de Cuenca puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.



Cristhian Andrés Cango Japón

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cristhian Andrés Cango Japón, bajo mi supervisión.



Dr. Samuel Sami-Howard. PE, PhD, JD.

DIRECTOR

DEDICATORIA

Mi proyecto de investigación está dedicado a toda mi familia y amigos que me han apoyado durante este largo trayecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios en primer lugar porque me ha dado la vida y también a mi padre Ángel Polivio Cango y a mi madre María Elena Japón y toda mi familia que me apoyaron en todo momento y me han impulsado para poder cumplir esta meta.

Un agradecimiento especial al Dr. Samuel Sami-Howard quien me supo guiar para concluir este trabajo, y a todos los que fueron mis profesores durante la carrera y me han instruido en diferentes ámbitos.

**PERMISO DEL AUTOR DE TESIS PARA SUBIR AL REPOSITORIO
INSTITUCIONAL**

Yo, **Cristhian Andrés Cango Japón** portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 1105680977. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "**Simulación dinámica de sistema híbrido Eólico y Pila-Combustible por Simulink/Matlab y validación de datos para una vivienda Tipo de hasta 2000 Wh**" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 09 de Agosto de 2018

F: 
Cristhian Andrés Cango Japón

Tabla de contenido

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
Tabla de contenido	VI
Tabla de figuras	VIII
Tabla de Ilustraciones	X
Tablas	XI
Lista de Anexos	XII
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
CAPITULO 1	1
1) FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	1
1.1. Energía del viento y Sistemas de generación eólica	1
1.1.1. Partes del Aerogenerador	4
1.1.2. Crecimiento de Generación eólica a nivel mundial	5
1.1.3. Crecimiento de Generación eólica a nivel Nacional	7
1.2. Pila Combustible	8
1.2.1. Generalidades de la Pila Combustible	9
1.2.2. Tipos de pila combustibles	11
1.2.2.1 Ventajas y desventajas de usar la pila combustible	16
1.2.2.2 Aplicaciones a los sistemas de pila combustible y electrolizadores de generación de hidrógeno	17
1.3. Electrólisis	18
1.4. Matlab (Laboratorio de matrices)	19
1.4.1 Entornos de trabajo de Matlab	19
1.4.2 Partes del Sistema híbrido eólico-pila combustible	20
2) INTRODUCCIÓN	21

2.1. Antecedentes generales de estudios hechos en el campo de sistemas híbridos con pilas de combustible.	21
2.2. Justificación.	22
2.3. Objetivos.	23
2.3.1. Objetivo general.	23
2.3.2. Objetivos específicos.	24
3) MODELO MATEMÁTICO SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDO EÓLICO PILA-COMBUSTIBLE	25
3.1. Ecuaciones para cálculos del sistema híbrido eólico pila combustible.	26
3.2. Estrategias de control de energía del sistema propuesto	33
3.3. Diagrama de flujo de sistema híbrido Eólico-Pila combustible	35
4) RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK Y DATOS EXPERIMENTALES.	36
4.1. Perfiles de viento obtenidos de sistema de medición HOBO en el Centro de Energías Renovables para validación.	36
4.2. Resultados de la simulación dinámica del sistema híbrido eólico-pila combustible.	38
4.3. Comparación y validación de modelo de simulación de PEMFC y datos recogidos de mediciones de pila combustible.	56
4.4. Dispositivos utilizados para la medición de voltajes y corrientes de pila combustible.	61
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES.	66
Nomenclatura	67
Bibliografía	69
ANEXOS	71

Tabla de figuras.

Figura 1. Partes de generador eólico	2
Figura 2. Proceso de transformación de energía eólica a eléctrica	2
Figura 3. Países con mayor capacidad de Potencia Instalada en 2017	6
Figura 4. Capacidad anual instalada por regiones desde 2009 hasta 2017	6
Figura 5. Proceso de transformación de energía en PEMFC	9
Figura 6. Primera pila combustible de ácido fosfórico (Año 1843)	10
Figura 7. Pila combustible utilizada en nave espacial Apolo	11
Figura 8. Pila combustible tipo PEM	12
Figura 9. Pila de combustible tipo AFC	13
Figura 10. Pila combustible de ácido fosfórico	14
Figura 11. Funcionamiento de Pila combustible de óxido sólido	14
Figura 12. Pila combustible tipo MCFC	15
Figura 13. Vehículo BMW que funciona en base a hidrógeno	17
Figura 14. Representación de una molécula de hidrógeno	19
Figura 15. Características del hidrógeno	19
Figura 16. Diagrama de sistema de generación híbrido eólico pila combustible	25
Figura 17. Circuito equivalente de una pila combustible tipo PEM	27
Figura 18. Ultra-capacitor conectado en paralelo a la pila combustible	30
Figura 19. Diagrama de flujo del esquema de control del sistema híbrido eólico pila combustible	35
Figura 20. Velocidad promedio de viento durante un día en el mes de febrero 2018	36
Figura 21. Velocidad promedio de viento durante un día en el mes de marzo 2018	37
Figura 22. Velocidad promedio de ráfagas durante el mes de febrero 2018	37
Figura 23. Curva de ráfagas de viento promedio diario durante el mes de marzo 2018	38
Figura 24. Sistema híbrido modelado en Simulink Matlab	39
Figura 25. Curva de potencia y función de transferencia de la turbina a viento	39
Figura 26. Subsistema de controlador de potencia	41
Figura 27. Subsistema de banco de baterías en serie	41
Figura 28. Convertidor elevador DC-DC / Inversor DC-AC / Carga eléctrica	42
Figura 29. Carga conectada al voltaje AC	43
Figura 30. Subsistema de pila combustible	44
Figura 31. Subsistema de control de temperatura	45
Figura 32. Ecuación de presión de oxígeno de la pila combustible	46
Figura 33. Ecuación de presión de hidrógeno de la pila combustible	46
Figura 34. Curva de Relación Velocidad de viento vs potencia generada	47
Figura 35. Subsistema de turbina a viento	48
Figura 36. Comparación de potencia obtenida a diferentes velocidades de viento	48
Figura 37. Curva de velocidad de viento vs Potencia Generada en la simulación	49
Figura 38. Comparación de las potencias en el controlador	49
Figura 39. Corriente de salida de turbina a viento en simulación	51
Figura 40. Cambio de resistencia de la carga	51
Figura 41. Cambio de temperatura en la pila combustible en simulación, respuesta al cambio de carga	52
Figura 42. Presión de hidrógeno y oxígeno en simulación en pila combustible	52
Figura 43. Masa de hidrógeno producido por el electrolizador	53
Figura 44. Voltaje DC de salida de convertidor elevador 120V	53
Figura 45. Salida de voltaje de inversor en corriente alterna	54
Figura 46. Salida de corriente de inversor a la carga	54

Figura 47. Corriente de la carga	55
Figura 48. Duración de batería sin generación de turbina a viento.....	55
Figura 49. Comparación de voltajes numérico y experimental con una carga de 0.3 W de potencia	57
Figura 50. Comparación de caída de corriente con carga de 0.3 W de potencia.	58
Figura 51. Comparación de eficiencia con datos experimentales y simulación, con una carga de 0.3 W.	58
Figura 52. Comparación de voltaje de pila combustible con eficiencia, con una carga de 0.37 W..	59
Figura 53. Comparación de corriente numérico y experimental con potencia de carga de 0.37 W	60
Figura 54. Comparación de eficiencia con datos experimentales y numérico con una carga de 0.37W.	60

Tabla de Ilustraciones.

Ilustración 1. Turbina eólica inventada por Charles F Brunch.	1
Ilustración 2. Estación meteorológica HOBO U30 NRC del centro de energías Renovables	3
Ilustración 3. Central eólica Villonaco Provincia del Loja / Cantón Loja	7
Ilustración 4. Parque eólico San Cristobal Galápagos	8
Ilustración 5. William Robert Grove.....	10
Ilustración 6. Pequeña pila combustible tipo PEM	18
Ilustración 7. Electrolizador Tipo PEME de una celda en el laboratorio CER.....	61
Ilustración 8. Ventana de programación de Arduino Mega.....	63

Tablas.

Tabla 1. Clasificación de la pila combustible según su temperatura de operación.	15
Tabla 2. Parámetros de controladores de flujo de pila combustible	31
Tabla 4. Características de turbina a viento AIR 403	40
Tabla 5. Tabla de datos de ultra-capacitor.....	42
Tabla 6. Tabla de periodos de activación y desactivación de resistencias.....	43
Tabla 7. Datos pila combustible e inversor.	44
Tabla 8. Tabla de velocidades de viento para simulación.....	46
Tabla 9. Comparación de potencias de carga, viento y PEMFC en distintos tiempos	50
Tabla 10. Datos de electrolizador de J101 JUNIOR Basic	56
Tabla 11. Datos de Pila combustible manual J101 JUNIOR Basic.....	61

Lista de Anexos.

Anexo 1. HOJA DE DATOS DE SISTEMA DE MEDICIÓN DE HOBO (DATASHEET)	71
Anexo 2. PILA COMBUSTIBLE JUNIOR BASIC J101 DEL CENTRO DE ENERGÍAS RENOVABLES CER ...	73
Anexo 3. HOJA DE DATOS TÉCNICOS Y MATERIALES DE LA PILA COMBUSTIBLE JUNIORBASIC (J101)	73
Anexo 4. TABLA DE CARGA ESTIMADA CON CONSUMO DE 2092WH, TIEMPO DE USO Y ENERGÍA UTILIZADA EN UN DÍA.	75
Anexo 5. DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA MEDICIÓN Y DIGITALIZACIÓN DE VOLTAJES Y CORRIENTES.	76

RESUMEN

En este proyecto se realizará una simulación utilizando la herramienta de Simulink Matlab de un sistema híbrido de generación entre una turbina a viento (400w) y una pila combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEM), adicional también el sistema contará con un banco de baterías para guardar la energía excedente generada que no haya sido consumida por la carga y alimentar un electrolizador cuando no haya potencia del viento, la energía obtenida por la turbina a viento servirá para alimentar un electrolizador o para alimentar directamente una carga.

Debido a que el voltaje generado por la pila combustible está entre los 48 y 80 VDC el voltaje es elevado mediante un convertidor elevador DC-DC a 120 VDC, para luego ser transformado en corriente alterna 120 V AC para alimentar una carga promedio de 650W por al menos 3 horas al día, pudiendo suministrar fácilmente hasta 2000Wh/día.

Se realizaron mediciones de la pila combustible Tipo PEM que nos dan a entender que la eficiencia de este tipo de pilas de combustible es baja debido a la energía que necesita para poder obtener el hidrógeno y posteriormente a convertir en energía eléctrica, la eficiencia puede ser incrementada utilizando más celdas de combustible en serie y aumentando el área activa de la pila, pero este incremento no será muy alto.

El modelo numérico presentado en Matlab está validado con los datos experimentales de la pila combustible y observamos un buen acuerdo entre los datos y el modelo presentado.

Palabras Claves: TURBINA A VIENTO, PILA COMBUSTIBLE PEM, ELECTROLIZADOR, MATLAB SIMULINK, VALIDACIÓN PROGRAMA.

ABSTRACT

In this project a simulation will be carried out using the Simulink Matlab tool of a hybrid generation system between a wind turbine (400w) and a fuel cell of Proton Exchange Membrane (PEM), additionally the system will also have a battery bank to save the generated excess energy that has not been consumed by the load and to feed an electrolyser when there is no wind power, the energy obtained by the turbine to wind will serve to feed an electrolyser or to directly feed a load.

Because the voltage generated by the fuel cell is between 48 and 80 vDC, the voltage is raised by a DC-DC converter to 120 VDC, to be converted into alternating current 120 V AC to feed an average load of 650W. At least 3 hours a day, being able to easily supply up to 2000Wh/day.

Measurements were made of the PEM type fuel cell that give us to understand that the efficiency of this type of fuel cells is low due to the energy it needs to be able to obtain the hydrogen and later to convert it into electrical energy, the efficiency can be increased using more fuel cells in series and increasing the active area of the battery, but this increase will not be very high

The numerical model presented in Matlab is validated with the experimental data of the fuel cell and we observed a good agreement between the data and the presented model.

Keywords: WIND TURBINE, PEM FUEL CELL, ELECTROLYSER, MATLAB SIMULINK, PROGRAM VALIDATION.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se busca aumentar el uso de las energías renovables para la generación eléctrica, y el abastecimiento a las personas o clientes que no cuentan con el servicio eléctrico normal debido a la lejanía de los lugares o simplemente el difícil acceso como para poder llegar con una red eléctrica convencional, sumado a eso también se busca generar con fuentes renovables en pos de obtener energía más limpia que contribuya con el medio ambiente.

En este proyecto se busca crear un simulador dinámico con la ayuda de la plataforma de Matlab/Simulink. El simulador permitiría visualizar como se va a comportar el sistema con la variación de sus diferentes condiciones, para lo cual deberemos crear un algoritmo computacional que permita emular el comportamiento de la pila combustible, además también se hará un análisis para ver qué tan eficiente puede resultar un sistema híbrido basado en una pila combustible y la turbina a viento.

Además de la energía eléctrica generada por la pila combustible, esta deja como residuo agua y calor; se tratará de medir la cantidad de agua y la temperatura con la que sale esta, además de la presión, variando las diferentes variables como la potencia de la carga, la potencia generada por el aerogenerador y se obtendrán curvas

El sistema planteado aquí puede suministrar 2000 Wh/día con una carga promedio de 650W durante el día, el sistema de turbina a viento puede abastecer directamente parte de la carga y la pila combustible genera el faltante, de acuerdo a las mediciones realizadas por el sistema de HOBO al medio día entre las 11am y 2 pm es cuando se podría extraer el máximo potencial del viento, en cuyo caso la energía sobrante se puede almacenar en el banco de baterías, por lo que el sistema tendría energía para abastecer a la vivienda a cualquier hora del día hasta consumir los 2000Wh como se puede ver en el anexo 3.

El tiempo en el que se estima se utilizaría la energía generada es de 10 de la mañana a 10 de la noche, pero con una carga constante de 650W esta podría soportar por 3 horas.

Cuando la potencia que se puede obtener del viento es mayor que el que necesite la carga, se recargan el banco de baterías con la energía excedente y se genera el hidrógeno para almacenar y utilizar cuando la pila combustible necesite, la pila combustible compensará en horas de la noche la energía que necesite la carga utilizando el hidrógeno almacenado, el

banco de baterías puede alimentar en la noche al electrolizador cuando no haya generación con la turbina a viento.

CAPITULO 1.

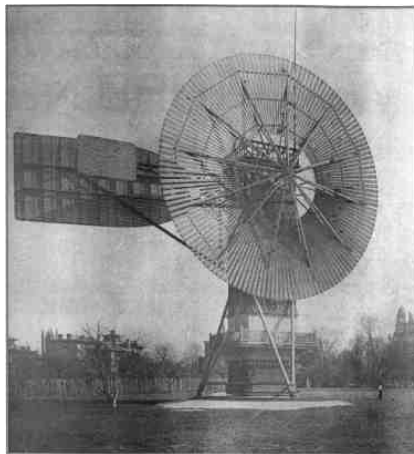
1) FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

Este capítulo se dará a conocer las bases teóricas en la cual se fundamenta todo el documento, tales como los sistemas de generación eólica, sistemas de generación por medio de pila combustible.

1.1. Energía del viento y Sistemas de generación eólica

La energía eólica ha sido utilizada por el hombre desde tiempos muy antiguos, 3000 A.C. ya se usaba la energía en las embarcaciones en el antiguo Egipto; se tienen datos de que durante el siglo VII se construyeron los primeros molinos de viento que se ubicaron en lo que ahora es Afganistán (antigua Persia), esos molinos que utilizaban velas de tela, se utilizaban para moler diferentes tipos de granos o en su defecto bombear agua de yacimientos ubicados bajo la tierra (pozos) (ekidom, s.f.).

En el año 1850 Charles F Brunch creó el dínamo y en 1887 inventó la primera turbina eólica para generar electricidad, totalmente automática. (Ilustración 1)



*Ilustración 1. Turbina eólica inventada por Charles F Brunch.
Fuente: (Ecured, s.f.)*

En la actualidad el sistema de generación eólica ha tenido muchos avances tecnológicos a fin de aprovechar al máximo la potencia obtenida de la fuerza del viento. El sistema de generación eólica está comprendido por los siguientes elementos: el Rotor, el generador alternador, la torre, y la cola como se puede observar en la Figura 1. Están diseñados para poder obtener el mayor potencial del viento, y su capacidad de generación en watts (W) dependerá del área de barrido de sus aspas.

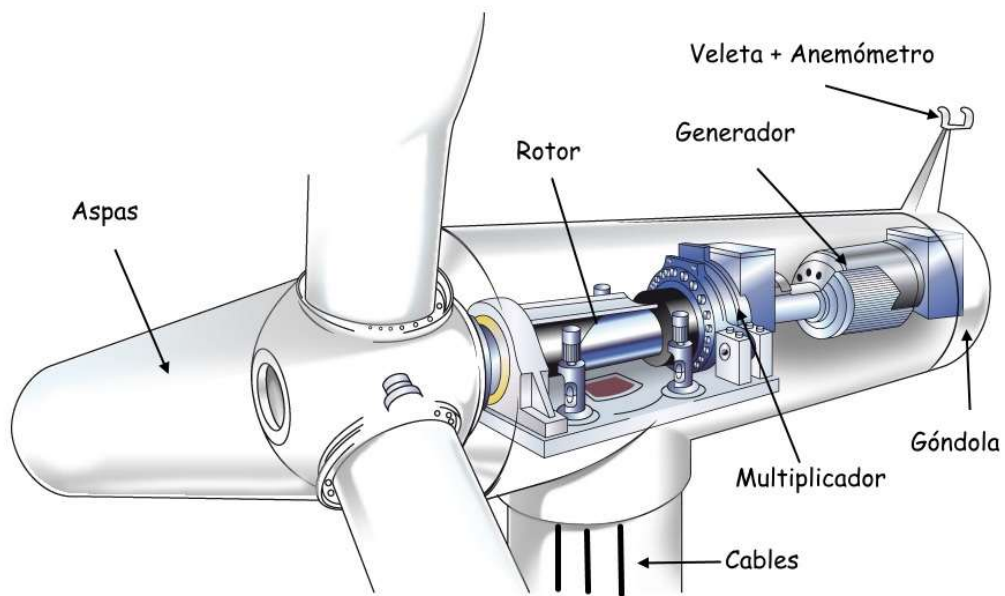


Figura 1. Partes de generador eólico

Fuente: (Partesdel.com, s.f.)

Relación entre velocidad del viento y potencia del viento.

Para poder tener energía eléctrica del viento se debe pasar por un proceso de transformación de energía, obteniendo primero la energía cinética del viento captada por las palas de la turbina y transformándola a energía mecánica para posteriormente transformarlo en la energía eléctrica que se utiliza en nuestros hogares como se puede ver en la figura siguiente.

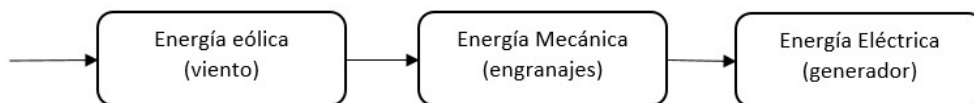


Figura 2. Proceso de transformación de energía eólica a eléctrica

Fuente: Autor

La relación entre la velocidad del viento y la potencia generada esta dada por la curva de potencia (Figura 34) , esta curva de potencia es única para cada tipo de turbina, y variará dependiendo de las características de cada una, tales como el area de barrido de las aspas, los engranajes internos y el

mismo generador eléctrico, en este documento se trabajará con las características de una turbina a viento de 400 W en trabajo nominal y 800 W máximo.

En la turbina a viento utilizada en este proyecto necesita una velocidad mínima de 3 m/s para empezar a generar energía eléctrica y una velocidad de aproximadamente 12.5 m/s (27.9 mph) para obtener una potencia de 400 W, pudiendo llegar a tener potencias de hasta 800 W con velocidades de 18 m/s como se puede observar en la figura 34.

Una de las desventajas de la generación con turbinas eólicas es que para transformarlo en energía eléctrica necesita pasar por un proceso como se puede ver en la Figura 2, ese proceso genera pérdidas por los cual un sistema de generación eólica no es completamente eficiente.

Estación meteorológica HOBO U30 NRC para medición de condiciones climáticas.

El sistema que se utilizó para medir velocidades de viento en el Centro de energías renovable es una estación meteorológica HOBO U30 NRC (Anexo 1), que medirá velocidades de viento, velocidades de ráfaga de viento, dirección de viento, y otros parámetros que no se tomarán en cuenta para este caso, como son precipitación de lluvia, temperatura. (Ilustración 2)



Ilustración 2. Estación meteorológica HOBO U30 NRC del centro de energías Renovables
Fuente: colombia.bioweb.co

El HOBO cuenta con un sistema propio HOBOWare software Pro, con el cual se puede analizar los datos obtenidos y realizar diferentes estudios, los datos se guardan en una memoria interna y son descargados cada cierto tiempo a una memoria USB y luego es

pasado al software propio de HOB0, en el software se pueden ver las curvas de tendencia de los diferentes parámetros.

Además, el software permite importar estos datos en formatos compatibles con archivos de texto, Excel, con los que se puede manejar estos datos según la necesidad de la investigación que se esté realizando. (Ver Anexo 1).

1.1.1. Partes del Aerogenerador

Rotor.

Es la parte que capta la energía cinética del viento y la transforma en energía mecánica para posteriormente entregar al multiplicador.

Multiplicador

El multiplicador está conformado por engranajes que se encargan de aumentar la velocidad con la que gira el eje para luego conectarse con el generador.

Eje de baja velocidad

Es la encargada de conectar el buje con el multiplicador y transmitir la energía que ha sido captada por las palas.

Eje de alta velocidad

El eje de alta velocidad se encarga de conectar el multiplicador con el generador y transmite la energía mecánica potenciada con el multiplicador para que sea transformada en energía eléctrica.

Generador

El generador es el que transforma la energía mecánica entregada por el multiplicador en energía eléctrica que luego será suministrada a la red eléctrica o una carga en específico.

Palas o Aspas

Las palas cumplen con la función de captar la energía cinética del viento, mientras mayor sea el diámetro de estas, mayor capacidad tendrá el generador, generalmente están contruidos de fibra de vidrio.

Buje

Es el punto donde se unen las palas y el eje de baja velocidad.

Góndola

Es la carcasa que protege todos los componentes mecánicos y está situado sobre la torre, está construido por fibra de vidrio y es reforzado con perfiles de acero inoxidable.

Torre

La torre se encarga de soportar todos los elementos mecánicos, y mientras mayor sea la altura de la torre se obtendrá una mayor capacidad de generación, debido a que a mayor altura mayor cantidad de viento.

1.1.2. Crecimiento de Generación eólica a nivel mundial.

La generación eólica ha ido en aumento durante los últimos años, esto debido a que se han estado tomando medidas para control de emisión de gases en el medio ambiente, y este tipo de generación es unas de las soluciones más viables hacia ese problema.

Por ende, cada vez se trata de mejorar la tecnología y así poder obtener un mejor rendimiento de estas plantas generadoras, que utilizan fuentes renovables que son más amigables con el medio ambiente. (Coincil, 2017)

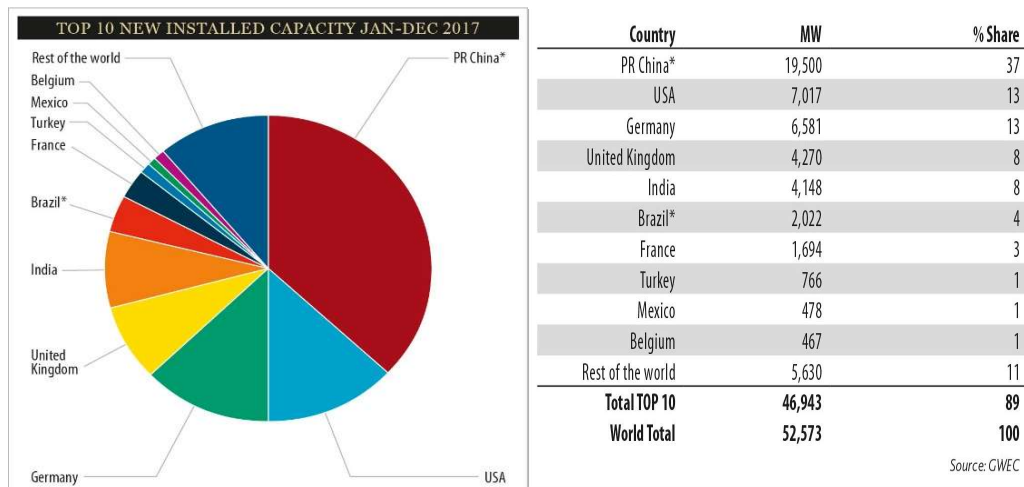


Figura 3. Países con mayor capacidad de Potencia Instalada en 2017

Fuente: (Coincil, 2017)

Como se puede observar en la figura 3 los países que lideran en cuanto a generación eléctrica por medio de la energía eólica, son China, seguido de Estados Unidos y Alemania, en la figura 5 se puede observar la capacidad instalada desde el 2009 hasta el 2017 tomando en cuenta las regiones, se ve que aunque haya disminuido notablemente durante los últimos 3 años, Asia sigue siendo líder en capacidad instalada de generación eólica, todos estos datos son tomados de la página oficial de la Global Wind Energy Coincil. (Coincil, 2017)

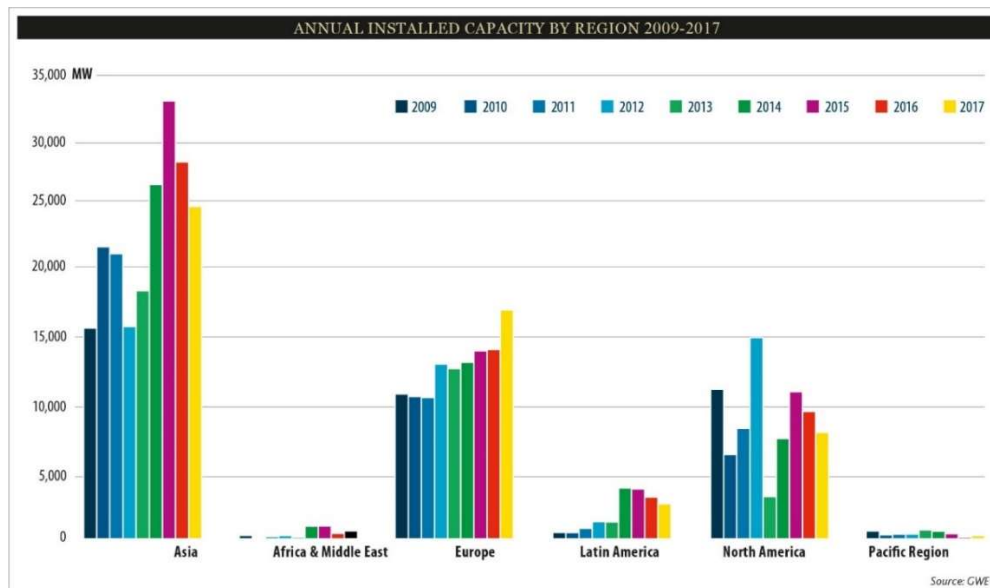


Figura 4. Capacidad anual instalada por regiones desde 2009 hasta 2017

Fuente: (Coincil, 2017)

1.1.3. Crecimiento de Generación eólica a nivel Nacional.

A nivel nacional el gobierno ha implementado el proyecto emblemático de Villonaco en la provincia de Loja cantón Loja, la central eólica tiene una capacidad de 16.5 MW de potencia, cuenta 11 aerogeneradores de 1.5 MW cada uno, siendo el primer proyecto de este tipo a nivel continental de todo el Ecuador, tiene velocidades promedio anuales de 12.7 m/s y con una altitud de 2700 msnm (Renovable, s.f.) (Ilustración 3).

Los aerogeneradores se encuentran a lo largo de la cumbre del cerro Villonaco, empezó a operar y suministrar energía a la Sistema Nacional Interconectado el 2 de enero de 2013, siendo la planta aerogeneradora más grande en el Ecuador.

Otra planta de generación eólica se encuentra en Galápagos, en la isla San Cristobal, que se inauguró en octubre del año 2007, dicha planta cuenta con una potencia instalada de 2.4 MW, con 3 aerogeneradores de 800KW cada una, la velocidad promedio anual de viento es de 6.8 m/s, ((INER), Marzo - 2013) el parque eólico cubre un aproximadamente el 32% de energía que se consume anualmente en la isla, y llega a cubrir hasta el 90% en épocas en las que el viento es más fuerte. (Ilustración 4)



Ilustración 3. Central eólica Villonaco Provincia del Loja / Cantón Loja
Fuente: www.energia.gob.ec/villonaco/



Ilustración 4. Parque eólico San Cristobal Galápagos
Fuente: ((INER), Marzo - 2013)

1.2. Pila Combustible.

La pila combustible puede ser utilizado en múltiples campos experimentales, para la generación de energía eléctrica en viviendas o transporte, puede ser utilizado junto con otros sistemas como el eólico, solar, biomasa, para mejorar el sistema y crear más eficiencia y confiabilidad.

Una de las características principales de la pila combustible es la transformación de la energía de manera directa a comparación con los otros tipos de sistemas antes mencionados, debido a que no tiene que pasar por diferentes procesos para obtener la energía eléctrica, como se puede observar en la figura 5 el proceso de transformación es directo.

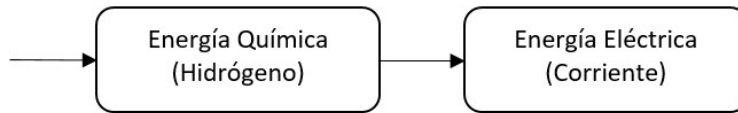


Figura 5. Proceso de transformación de energía en PEMFC

Fuente: Autor

1.2.1. Generalidades de la Pila Combustible.

La pila combustible es un dispositivo que permite transformar la energía química en energía eléctrica mediante una reacción química, utilizando el hidrógeno para la generación de energía eléctrica, cabe recalcar que el hidrógeno no se puede utilizar directamente, por lo mismo no es considerada una fuente renovable sino más bien un vector energético, y necesita de una fuente primaria para poder explotar sus beneficios, la pila combustible tipo PEM utiliza hidrógeno con 99.95% de pureza como combustible para la generación de electricidad, y también utiliza oxígeno en un 21% de pureza para obtener agua al mezclar con el hidrógeno.

Historia de la pila-Combustible

Los principios de funcionamiento de la pila combustible fueron descubiertos en el año 1838 por el químico Christian Friedrich Schönbein, luego en 1843, el científico William Robert Grove (ilustración 5) creó la primera pila de hidrógeno con materiales que actualmente se utiliza en las pilas de ácido fosfórico. (history, American history, s.f.) aquel experimento podía generar una corriente de aproximadamente 12 A con un voltaje de 1.8 V.

Pero no fue hasta aproximadamente 100 años después, en 1959, que Francis Thomas Bacon fabricó una pila de hidrógeno que tenía un rendimiento de 5 Kw.



Ilustración 5. William Robert Grove

Fuente: American history (2018)

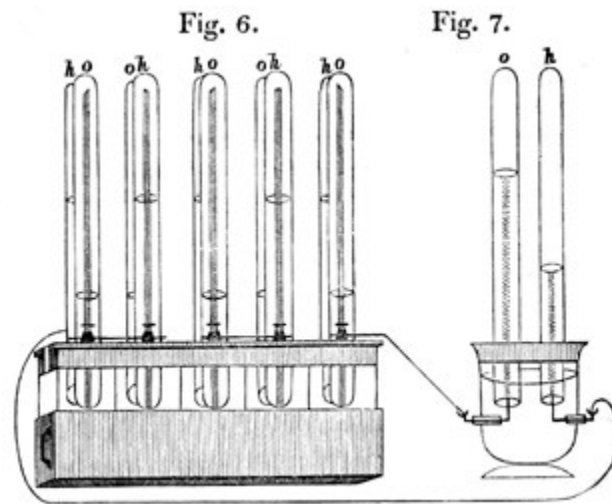


Figura 6. Primera pila combustible de ácido fosfórico (Año 1843)

Fuente: American history (2018)

Al principio el costo para la fabricación de estas pilas era bastante alto, sin embargo, la fiabilidad que daban hizo que fueran utilizadas en el programa espacial Apolo (1968), este generaba energía eléctrica y agua para la tripulación.

AFCs en la historia

Pila de Combustible de 1,5 kW de la nave espacial Apollo que llevó al hombre a la luna. Se utilizaron 2 unidades para el suministro de electricidad y agua potable.



Figura 7. Pila combustible utilizada en nave espacial Apollo.

Fuente: Pilasdecombustible.wordpress.com

La pila combustible Tipo PEM fue creada en las instalaciones de la General Electric a principios de la década de los 60, cuando la Empresa desarrolló una pila de combustible para un programa con la oficina de Barcos de la Marina de los Estados Unidos. (history, American history, s.f.)

La tecnología de la pila de combustible tipo PEM sirvió también en el proyecto GEMINI de la NASA, que a pesar de tener malos funcionamientos pudo completar varios vuelos.

1.2.2. Tipos de pila combustibles

Hay diferentes tipos de pila-combustible que se indicarán a continuación, para este proyecto se utilizará el modelo de la pila combustible tipo PEM que se clasifica como una pila de baja temperatura, las siglas PEM vienen del acrónimo de pila de membrana polimérica por sus siglas en Ingles. (Martinez Reyes, 2016)

Las pilas de combustible se pueden clasificar por diferentes parámetros como por ejemplo temperatura de trabajo, el combustible y oxidante que utilizan, si es de combustible directo o indirecto, o por el electrolito que usan, en este documento se las clasificó por la

temperatura de trabajo por lo tanto se dividió en 2 grupos, los de baja temperatura y los de alta temperatura. (Martinez Reyes, 2016).

En el grupo de baja temperatura se encuentra las pilas de combustible que tienen temperaturas de trabajo que van entre los 20 °C y 100 °C.

- **Pila combustible Tipo PEM**

Las pilas tipo PEM usan como combustible el hidrógeno, y al oxígeno como un oxidante para crear la reacción química que libere los electrones que luego pasarán por un circuito eléctrico externo, que a su vez dejará como residuo del proceso agua, este tipo es uno de los sistemas más amigables con el medio ambiente. (Khater, Abdelraouf, & Beshr, 2011)

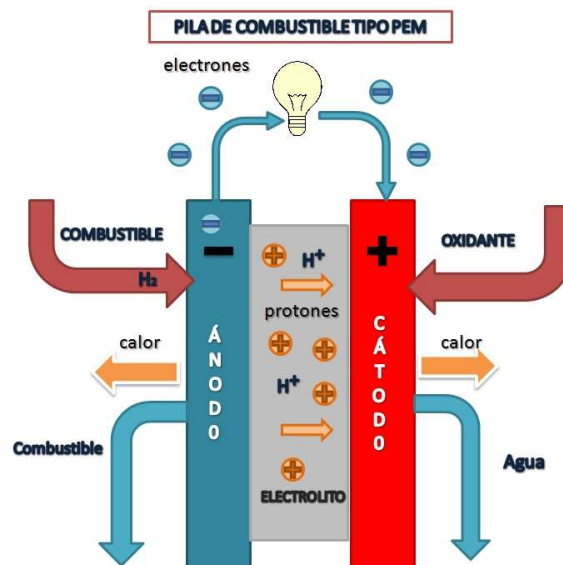


Figura 8. Pila combustible tipo PEM

Fuente: Wikipedia / 2018

En la figura 8 se puede apreciar el funcionamiento general de la pila combustible, como se puede observar por el lado del ánodo entra el combustible, que en este caso sería el hidrógeno, y por el lado del cátodo entra el oxidante (oxígeno) (Feroldi & Basualdo, 2012), en el ánodo el electrón es separado del átomo de hidrógeno, al tener un circuito eléctrico externo el electrón pasa por la carga y llega al cátodo, los átomos de hidrógeno pasan por el electrolito y se unen con el átomo de oxígeno, teniendo como resultado el agua residual con temperaturas que varían entre 20 °C y 100 °C, por lo que se puede decir que también obtenemos calor.

- **Pilas de combustible alcalinas AFC**

La pila de combustible AFC fue la primera pila comercial y es usada en la industria espacial, a diferencia del anterior este utiliza una solución de hidróxido de Potasio en agua como electrolito, teniendo temperaturas que oscilan entre 90 °C y 100 °C, cabe mencionar que este tipo de pilas es el que se utilizó en viajes espaciales para la generación de electricidad y aprovisionamiento de agua a la tripulación, también es muy utilizada en aplicaciones militares.

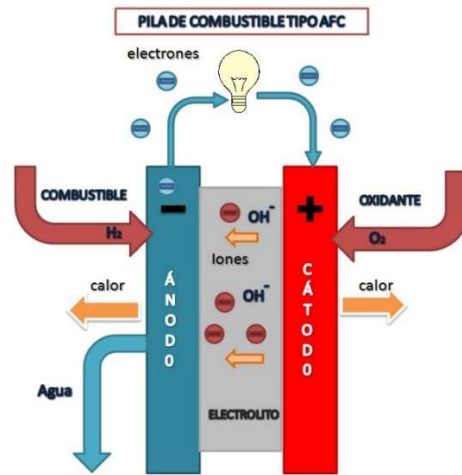


Figura 9. Pila de combustible tipo AFC.

Fuente: Wikipedia / 2018

- **Pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC)**

Este tipo de pilas utiliza ácido fosfórico líquido (H_3PO_3) como electrolito, de ahí su nombre, a concentraciones que van del 95% y 98%. La reacción que produce esta pila es igual a la de la pila combustible PEM, obteniendo agua y calor como residuo.

Su temperatura de operación oscila entre 150 y 220 °C debido que si se tiene temperaturas más bajas el ácido fosfórico no es un buen conductor iónico, el rendimiento de esta pila en la generación eléctrica ronda entre los 37% y 42%, por lo que se debe aprovechar el calor generado por este en sistemas de cogeneración y por ende aporta a la eficiencia global del sistema.

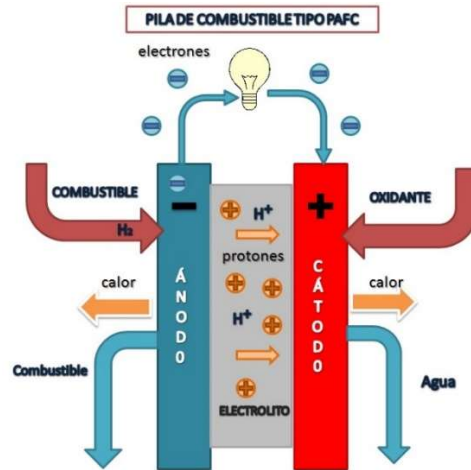


Figura 10. Pila combustible de ácido fosfórico

Fuente: Wikipedia / 2018

La temperatura de las pilas combustibles denominados de alta temperatura se encuentra alrededor de los 650 °C y los 1000 °C, su eficiencia es alrededor del 50% al 60%.

- **Pila de combustible de óxido sólido (SOFC)**

Esta pila trabaja con temperaturas que oscilan entre los 800°C y 1000°C, utiliza óxido metálico no poroso o sólido cerámico, es muy utilizada en una gran variedad de aplicaciones estacionarias. Actualmente se realizan investigaciones para bajar le temperatura de trabajo a 600-800°C.

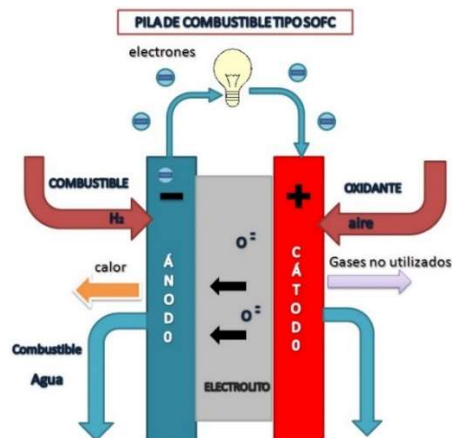


Figura 11. Funcionamiento de Pila combustible de óxido sólido

Fuente: Wikipedia / 2018

- **Pila de combustible de carbonato fundido (MCFC)**

Este tipo de pila combustible utiliza carbonatos alcalinos sobre una matriz cerámica y su temperatura de operación de 650 °C, una de las ventajas de este tipo de pilas es que pueden utilizar como combustible óxidos de carbono lo cual permite alimentar con gases que proceden del carbón.

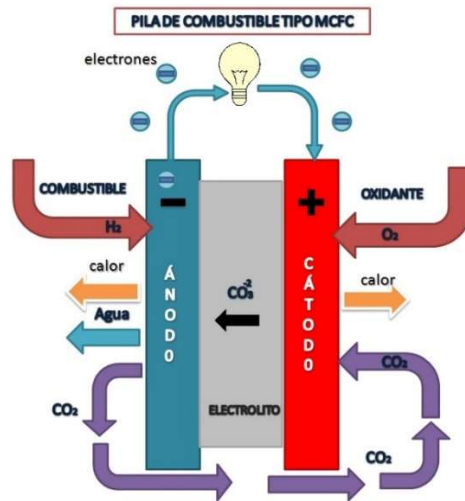


Figura 12. Pila combustible tipo MCFC

Fuente: Wikipedia /2018

En la tabla 1 se muestra todos los tipos de pilas de combustible de acuerdo a su temperatura de trabajo.

Tabla 1. Clasificación de la pila combustible según su temperatura de operación.

Fuente: Autor

Pilas de baja temperatura	Pilas de alta temperatura
Pila-combustible de Membrana de Intercambio protónico (PEMFC)	Pila de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)
Celdas de Combustible Alcalinas (AFC)	Pila de Combustible de Carbonato fundido (MCFC)
Pila de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)	

Una de las principales características de la pila combustible de baja temperatura es que son de rápido arranque, teniendo un tiempo de respuesta bastante corto, lo cual es vital cuando se tiene variaciones de carga y es más útil para trabajar en horas pico de consumo, todo lo contrario, con las pilas de combustible de alta temperatura que tienen tiempos bastante prolongados en el arranque por lo cual estos podrían trabajar como unidades de generación base. (San Martín , Zamora, Aperribay, & Eguia, 2009).

1.2.2.1 Ventajas y desventajas de usar la pila combustible.

Como en cualquier tecnología esta tiene tanto ventajas como desventajas, que se enlistaran a continuación, dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar.

Ventajas

- Alta confiabilidad
- Fácil instalación debido a que las celdas son fabricadas solo para bajas potencias las cuales se ponen en serie para aumentar su capacidad de acuerdo a la necesidad y sin perder rendimiento.
- No emiten ruido al no tener partes móviles.
- Pueden alimentar una carga el tiempo ilimitado mientras tengan el combustible y el oxidante.
- Flexibilidad
- Amigable con el medio ambiente.
- Tiene la capacidad de utilizarse en cogeneración o generación distribuida, así como en vehículos.

Desventajas

- Alto costo de instalación inicial debido a las grandes inversiones para mejorar su tecnología.
- En el caso de la pila combustible tipo PEM una de las desventajas es la sensibilidad hacia las impurezas que pueda tener el combustible

1.2.2.2 Aplicaciones a los sistemas de pila combustible y electrolizadores de generación de hidrógeno.

El sistema de pila combustible y puede tener diversos campos de aplicación tanto en campo estacionario o como también aplicaciones móviles, a continuación, se dará algunos ejemplos de lugares de está siendo aplicado este tipo de tecnología.

Las pilas combustible actualmente son utilizadas en la industria automovilística con el fin de evitar el uso de combustibles fósiles como gasolina o diésel, pero un análisis hecho por (Ibañez, 2012), hace una comparación entre el consumo y coste entre diferentes fuentes para mantener energizado un auto, y determina que el coste que utilice el hidrógeno como combustible es más caro.(Figura 13)



Figura 13. Vehículo BMW que funciona en base a hidrógeno.

Fuente: (Ibañez, 2012)

Para el análisis hizo a referencia a vehículos que utilizan combustibles fósiles, hidrógeno, vehículos eléctricos, el Toyota Prius III que utiliza combustible fósil y es considerado uno de los más eficientes, recorriendo 100 Km con 5.27 euros, un vehículo con hidrógeno necesitaría 12.00 euros para recorrer la misma distancia, mientras que un vehículo eléctrico necesitaría 2.38 euros, teniendo como conclusión que un vehículo con hidrógeno como combustible es mucho más costoso eso sin contar que el costo de un vehículo de hidrógeno de por sí ya es elevado.

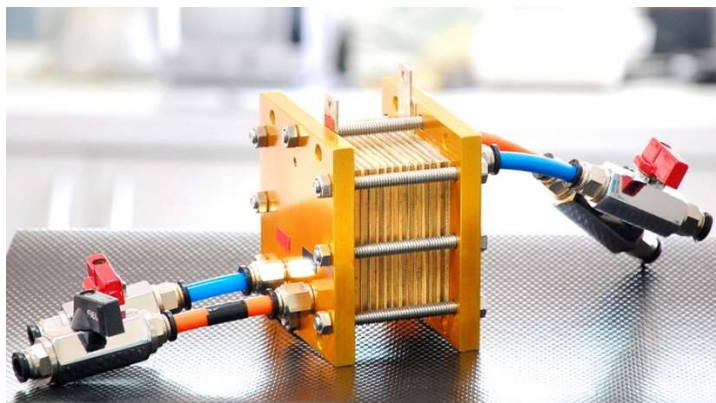


Ilustración 6. Pequeña pila combustible tipo PEM
Fuente: <http://www.unsam.edu.ar/tss/energia-para-zonas-aisladas/>

1.3. Electrólisis.

El electrolizador cumple una función muy importante para la generación mediante la pila combustible, debido a que la pila combustible necesita hidrógeno con la máxima pureza posible, el electrolizador se ocupará de separar las moléculas y entregar a la pila combustible para que esta se encargue de generar la energía eléctrica, agua y calor.



Para separar el hidrógeno del agua se necesita aplicar una corriente por dos electrodos o placas que estén lo más cerca posible pero que no se toquen, esto provoca una reacción química separando las moléculas de hidrógenos y oxígeno.

Existen al igual que las pilas de combustible diferentes tipos de electrolizadores con las que se puede generar hidrógeno, y básicamente dependerá del tipo de combustible o el catalizador que se utilice para obtener el hidrógeno.

Hidrógeno.

El hidrógeno se caracteriza por ser el elemento más simple, debido a que solo cuenta con un protón y un electrón, en su forma de gas incoloro, inodoro

El hidrógeno es uno de los recursos más abundantes en el medio ambiente conformando un 70% de toda la materia que es visible en el universo, y con el que se puede generar

energía limpia, pero lamentablemente no se la puede usar de forma directa, sino que se necesita una energía externa para poder liberar toda la energía que tiene este elemento, por ende, este no puede ser considerado como una fuente de energía renovable, sino más bien como un vector energético.

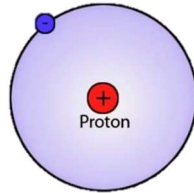


Figura 14. Representación de una molécula de hidrógeno
Fuente: (teach, s.f.)

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica y su número atómico es 1 (Figura 15), tiene una masa atómica de 1.00794, y en su estado gaseoso es altamente inflamable, por lo que se debe tener mucho cuidado al momento de manejar este elemento.

<div style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">H</div> <div style="text-align: center; font-weight: bold;">Hidrógeno</div>	Num Atómico	1
	Masa Atómica	1.00794
	Conf. Elec.	1s ¹
	Grupo	1
	Periodo	1
	Serie Química	No metales

Figura 15. Características del hidrógeno
Fuente: dequimica.com

1.4. Matlab (Laboratorio de matrices)

El Matlab/Simulink o laboratorio de matrices es una plataforma que permite el desarrollo de una innumerable cantidad de entornos o sistemas, cuenta con una gran variedad de herramientas que hacen más fácil la creación de diferentes tipos de sistemas, ya sea mecánico, eléctrico, químico, o matemático, etc.

1.4.1 Entornos de trabajo de Matlab

El entorno de desarrollo de Matlab permite crear diferentes ámbitos mediante el uso de sus herramientas, las cuales pueden ayudar a modelar los diferentes tipos de sistemas

variando parámetros de entrada para luego poder ver las reacciones del sistema a las mismas. (MathWorks, 2015)

Matlab cuenta con distintos entornos de trabajo como Simulink, Guide, Editor, y el Comand Windows, en cada uno de estos entornos el modo de programación es distinto, pero en si el producto final cumpliría con el mismo propósito. (MathWorks, 2015)

En Simulink se trabaja mediante bloques que cumplen una función designada que son unidas mediante conectores para obtener un resultado, en el entorno de Editor se trabaja mediante códigos y variables que escribe el programador para obtener un resultado, el Guide se utiliza cuando se quiere hacer al programa más estético y amigable con el usuario, todos los entornos antes mencionados pueden trabajar juntos, pudiendo así tener un sistema más complejo.

1.4.2 Partes del Sistema híbrido eólico-pila combustible

El sistema híbrido eólico pila combustible consta de las siguientes partes las mismas que se detallarán en el capítulo 3.

- Turbina a viento
- Pila-combustible
- Controlador de potencia
- Electrolizador
- Banco de baterías
- Ultra-capacitor
- Controlador de flujo de combustible de PEMFC

CAPITULO 2.

2) INTRODUCCIÓN

2.1. Antecedentes generales de estudios hechos en el campo de sistemas híbridos con pilas de combustible.

En el estudio de (Ogawa, Takeuchi, & Kajikawa, 2018) se analizó la tendencia de crecimiento de publicaciones hechas acerca de sistemas que trabajan con electrolizadores y pilas de combustible, teniendo como dato que el número de publicaciones académicas acerca de pilas combustible fueron aproximadamente 96000 desde el 2016 que sobrepasa en gran manera a los 12000 publicaciones acerca de electrolizadores.

Esto nos da a entender que los sistemas de pilas combustibles no son para nada nuevos, más bien son un campo muy conocido ya en la actualidad; pero aún no se ha conseguido elevar el porcentaje de eficiencia a un nivel óptimo, aunque cada vez son más utilizados dentro de la industria automovilística, por otro lado, no se han realizado muchas publicaciones acerca de los electrolizadores, ya sea del tipo PEME o de cualquier otro tipo de electrolizador.

En vista del creciente desarrollo de esta tecnología se pretende realizar investigación con el fin de obtener experiencias en este tipo de sistemas que trabaje en conjunto con otros sistemas de generación de energía como es la eólica, solar, bioamasa, mareomotriz, etc. En el centro de energías renovables (CER) de la Universidad Católica de Cuenca se ha hecho investigaciones acerca de sistemas híbridos basados paneles solares con pilas combustibles, en dicha investigación se buscó determinar la eficiencia a diferentes tipos de potencia de carga. (Sami & Marin, 05 May -2018)

En (Esmaeili & Shafiee, 2012) se plantea un pequeño sistema híbrido en cogeneración de energía eólica, solar, y pila combustible, en el cual se puede ver la interacción entre las diferentes fuentes de energía, y se puede observar la compensación de una fuente cuando alguna de las otras 2 fuentes no cuenten con la energía necesaria, y así poder mantener alimentada una carga eléctrica. En (Onar, Uzunoglu, & Alam, 2006) también nos plantea un sistema muy parecido al de (Esmaeili & Shafiee, 2012) con la diferencia que este no utiliza generación de paneles solares para alimentar los electrolizadores y el nivel de voltaje de salida está entre 363.5 y 343.8 V.

En la investigación llevada a cabo por (Khan & Iqbal, 2004) propone un sistema mucho más simple y de una capacidad de generación no muy alta, utilizando solamente la energía eólica combinada con la pila combustible para alimentar una carga variable en el tiempo, y utilizando ultra capacitores para compensar las fluctuaciones repentinas de carga y evitar fallas, pero con la desventaja de que si no cuenta con las energía eólica, el electrolizador no podría generar el hidrógeno necesario para la activación de la pila combustible.

En este sistema el nivel de voltaje de salida de la pila combustible es de 65 V nominales, llegando a obtener hasta 80V y pudiendo caer hasta los 48V, en cuyo caso se activa el controlador de flujo para permitir el paso de mayor cantidad de combustible (hidrógeno) (Khan & Iqbal, 2004).

Una de las principales razones por las que se realiza este tipo de investigaciones relacionadas a pila combustible y la generación con energías renovables, es debido a que este tipo de sistemas es la que causa menos o casi nada de impacto ambiental directo como indica (Asencio) en comparación con otros tipos de generación.

2.2. Justificación.

En la actualidad se hacen estudios para determinar si un sistema de generación renovable es factible en determinadas zonas donde no se puede llegar con energía eléctrica convencional, la simulación que se desea desarrollar ayudará a prever el si las condiciones son convenientes para la instalación de un sistema híbrido pila combustible-Turbina a viento para una determinada zona.

Este programa puede ser útil para estudiar el comportamiento de un sistema híbrido, el problema es muy importante por la creciente demanda de energía y las fuentes de energía eléctrica convencionales se agotan, por lo tanto, se opta por la utilización de fuentes que sean renovables, por ejemplo, el viento en los aerogeneradores, el sol en los sistemas fotovoltaicos, o biomasa, la energía mareomotriz, etc.

También se tiene en cuenta que las energías renovables a pesar de ser inagotables, no son constantes y dependen muchos de las condiciones de clima del entorno en el que se vaya a instalarlos, por lo que la obtención de potencia eléctrica de estas fuentes no va a ser constante, es por ello que se utiliza diferentes tipos de sistema trabajando en cogeneración.

Para instalar turbinas a viento, se debe hacer un análisis previo de las velocidades de viento, velocidades de ráfaga de viento, dirección del viento, temporadas en las que se tiene más y menos viento, las velocidades mínimas y máximas de viento, de esta manera determinar con la curva de potencia la mejor opción en cuanto a tipo de turbina a instalar.

Los sistemas de pilas combustibles se han venido desarrollando desde hace ya varios años, por lo que no es una tecnología nueva, este tipo de generación ayuda a aprovechar el hidrógeno como vector energético para la generación de electricidad y compensación cuando el sistema basado en turbina a viento no cuente con la energía primaria (energía eólica) para la generación.

El hidrógeno para la generación de electricidad puede ser obtenida por diferentes medios, ya sea por electrolisis de agua, de la biomasa, o también de combustibles fósiles, debido a que estos contienen hidrógeno en sus moléculas, puede ser almacenada y entregada a la pila combustible cuando este requiera, lo cual da al sistema autonomía y sustentabilidad.

Los sistemas híbridos de energía renovables pueden ser instalados de manera aislada o remota como también pueden ser conectadas a la red eléctrica convencional, en este proyecto se trabajará con sistema de generación aislado, que tiene un consumo de energía promedio de 2000Wh, teniendo en cuenta que los aparatos eléctricos que se instalan en una vivienda no se usan constantemente algunos se utilizan por periodos de solamente minutos.

Para la simulación del sistema se tomó en cuenta la potencia nominal de generación de la turbina (400W) y una carga de 650W que podrían ser alimentadas durante el día, pero para la simulación se ha tomado un tiempo promedio de 3 horas que representarían el tiempo de consumo que se tendría en un día, teniendo como consumo total en un día de 2000Wh.

2.3. Objetivos.

2.3.1. Objetivo general.

Crear un simulador dinámico con la ayuda de la plataforma de Matlab/Simulink y validación del simulador con datos experimentales de laboratorio de centro de energías renovables.

2.3.2. Objetivos específicos.

- Desarrollar un simulador con la plataforma de Matlab/Simulink que nos permita visualizar como se va a comportar el sistema con la variación de sus diferentes condiciones.
- Desarrollar un algoritmo computacional para la simulación del comportamiento de la pila-combustible.
- Analizar y validar que tan eficiente puede resultar el sistema híbrido basado en la turbina a viento y pila-combustible.

CAPITULO 3.

3) MODELO MATEMÁTICO SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDO EÓLICO PILA-COMBUSTIBLE

En este capítulo se dará a conocer las diferentes ecuaciones y fórmulas que se utilizaron para la creación del sistema simulado en la plataforma de Simulink /Matlab. El sistema general está compuesto por los elementos que se pueden observar en la figura 16, las diferentes ecuaciones matemáticas describen el funcionamiento de cada uno de ellos, en la figura 19 se muestra el diagrama de bloques en el que se detalla mejor

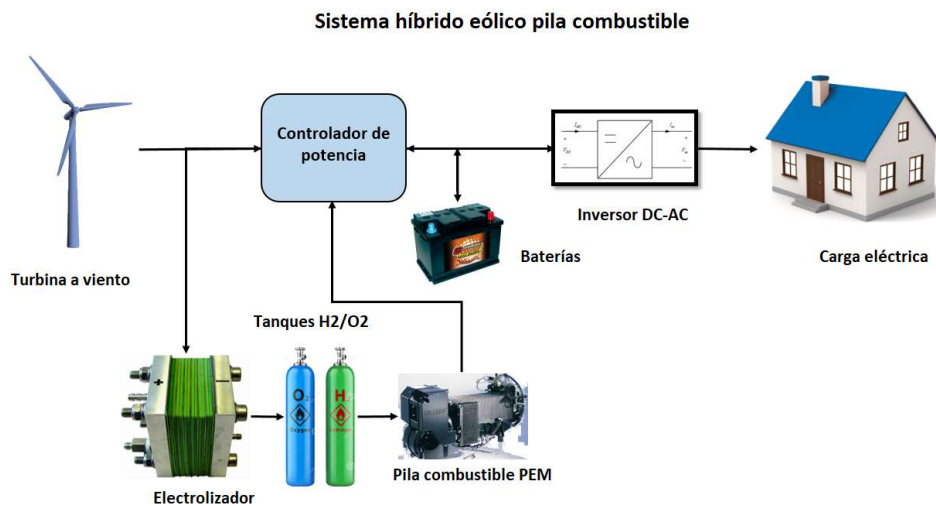


Figura 16. Diagrama de sistema de generación híbrido eólico pila combustible.
Fuente: Autor

En la figura 16 está representado el sistema híbrido, el mismo que actúa de la siguiente manera, la turbina a viento alimenta al electrolizador para que este a su vez genere el hidrógeno y oxígeno y sea almacenado en tanques separados y a su vez también envía energía al controlador de potencia, el hidrógeno y oxígeno almacenado es utilizado en la pila combustible para la generación de corriente eléctrica DC, la energía obtenida en la pila es enviada al controlador de potencia en donde se realiza la estrategia de control, la energía total que se tiene en el controlador se envía al inversor para convertir en corriente alterna AC.

El banco de baterías está para almacenar energía cuando la potencia de carga sea menor que la generación, y también será útil cuando el sistema de turbina a viento no está en la

capacidad de generar debido a bajas velocidades de viento que permitan aprovechar esta energía, por lo cual las baterías estarán alimentando el electrolizador.

3.1. Ecuaciones para cálculos del sistema híbrido eólico pila combustible.

Turbina a viento.

La turbina a viento utilizada en este sistema puede extraer la potencia máxima cuando tenga una velocidad de viento de 17.9m/s (Figura 34) cuando sobrepase esta velocidad la turbina se bloqueará para impedir sobre-velocidades en la turbina que puedan resultar dañándola, la curva de comparación entre la potencia y velocidad es no lineal. (AIR403)

La curva de potencia de la turbina a viento utilizada fue obtenida del fabricante AIR403, digitalizada en una tabla en consiguiente los resultados fueron usados para la simulación.

Para la obtención de la potencia generada por la turbina a viento del simulador se utilizó la siguiente función de transferencia (Khan & Iqbal, 2004)

$$\frac{y(s)}{x(s)} = 0.25/(s^2 + 0.7s + 0.25) \quad (2)$$

Donde $x(t)$ es la potencia que se obtiene de la curva de potencia para una velocidad de viento ya establecida, mientras que $y(t)$ es la potencia actual obtenida en la salida de la turbina a viento. (Sami & Garzon, 2017)

- Pila combustible.

En (Khan & Iqbal, 2004) establece que el voltaje ideal estándar de una pila de combustible tipo PEM es de 1.229 V obteniendo agua como residuo, el voltaje de la pila decae debido a pérdidas irreversibles. El potencial termodinámico es entonces determinado por la ecuación de Nernst.

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - Tr) + 4.3085 \times 10^{-5} * T * (\ln P_{H_2} + 0.5 \ln P_{O_2}) \quad (3)$$

Donde P_{H_2} es la presión en atmosferas del hidrógeno, P_{O_2} es la presión del oxígeno y T es la temperatura en grados Kelvin, Tr es la temperatura de referencia (298.15 K)

Para calcular la concentración de oxígeno en el gas o líquido se puede definir por la ley de Henry como se muestra en (3) (Sami & Marin, 05 May -2018)

$$CO_2 = PO_2 / (5.08 \times 10^6 \exp(-\frac{498}{T})) \quad (4)$$

Las ecuaciones para el sobre voltaje que se necesita para la activación y resistencia interna fueron desarrollados desde análisis empíricos (Amphlett, y otros) está dado como:

$$\eta_{act} = -0.9514 + 0.00312T - 0.000187T \ln(i) + 7.4 \times 10^{-5} T \ln(CO_2) \quad (5)$$

$$R_{int} = 0.01605 - 3.5 \times 10^{-5} T + 8 \times 10^{-5} i \quad (6)$$

i es la corriente de la pila combustible, la resistencia de activación es determinada como negativa para conseguir un valor positivo de Ra .

$$Ra = -\eta_{act} / i \quad (7)$$

Las pérdidas por voltaje óhmico están dadas por la ecuación 7 y en la siguiente figura se tiene una gráfica del circuito eléctrico equivalente de la pila combustible, en la cual se puede observar que la resistencia interna está en serie, por lo cual hay una caída de tensión que es tomada en cuenta para el cálculo del voltaje real que se tendría a la salida de la pila combustible.

$$\eta_{ohmic} = -i * R_{int} \quad (8)$$

La combinación de las ecuaciones anteriores da como resultado el voltaje de salida de la pila y está definido como

$$Vs = E - v_{act} + \eta_{ohmic} \quad (9)$$

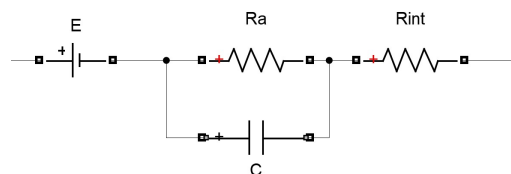


Figura 17. Circuito equivalente de una pila combustible tipo PEM
Fuente: autor

La ecuación diferencial (9) es la describe el voltaje de salida de la pila combustible, la cual tiene como parámetros la corriente que necesita (i) para alimentar la carga y compensar cuando el aerogenerador no esté en la capacidad de proporcionar la potencia necesaria a la carga.

$$\frac{dv_{act}}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{v_{act} * C}{Ra} \quad (10)$$

La cantidad de hidrógeno y oxígeno consumido por la pila combustible está determinada por la corriente de la pila combustible además de los flujos entrantes y salientes (mol/s), si se conoce los flujos de entrada y salida del hidrógeno y oxígeno, las presiones de los gases dentro del humidificador pueden ser descritos utilizando el principio de conservación de mole.

Para calcular la presión del hidrógeno y el oxígeno, se tienen las ecuaciones (10) y (11) conociendo los caudales de hidrógeno y oxígeno se puede describir la presión (atm) del ánodo con la siguiente ecuación.

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2}}{dt} = \dot{m}_{H_2} - (\rho_{H_2} UA)_{out} - \frac{i}{2F} \quad (11)$$

Donde V_a es el volumen en litros, U es la velocidad del combustible, R es la constante universal del gas (0.0821 1 atm/mol K), T es la temperatura en grados kelvin (K), ρ_{H_2} es la densidad molecular del hidrógeno, A es el área del canal de flujo y F es la constante de Faraday (96485 C). De la misma manera se tiene la ecuación para calcular la presión en el cátodo (11),

$$\frac{V_c}{RT} \frac{dP_{O_2}}{dt} = \dot{m}_{O_2} - (\rho_{O_2} UA)_{out} - \frac{i}{2F} \quad (12)$$

V_c es el volumen del cátodo en litros y ρ_{O_2} es la densidad molecular del oxígeno.

$$GIC = ETA + PCA \quad (13)$$

La resistencia interna y la corriente de la pila combustible pueden ser usados para calcular las pérdidas de calor interno

$$GIC = i^2 (R_a + R_{int}) * n_{cell} \quad (14)$$

Donde n_{cell} es el número de celdas de la pila combustible que están en serie.

$$ETA = C_t * dT/dt \quad (15)$$

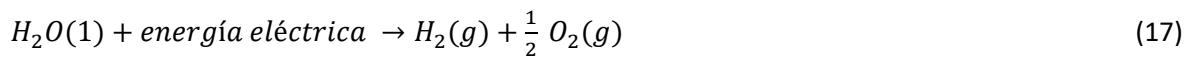
Donde C_t es la capacidad calorífica de la pila combustible de la pila combustible la misma que es asumida como 10 000 J/°C.

$$PCA = T - T_a/R_t \quad (16)$$

Donde T_a es la temperatura ambiente y es asumida como 25°C y $R_t = 0.04$ °C

- Electrolizador

Para la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno se necesita pasar una corriente eléctrica entre los dos electrodos separados por el electrolito acuoso, obteniendo la siguiente reacción.



Las características del voltaje y la corriente de un electrolizador dependen de la temperatura de funcionamiento de la misma. Estas características son altamente no lineales, siguiendo el lineamiento de la ley de Faraday, la producción de hidrógeno en una celda de electrolizador es directamente proporcional a la cantidad de electrodos transferidos a los electrodos, y este a su vez es equivalente a la corriente eléctrica en el circuito.

$$n_{H2} = \frac{\eta_F n_c i_e}{2F} \text{ (mol/s)} \quad (18)$$

Donde i_e es la corriente del electrolizador, n_c es el número de celdas de electrolizador en serie y η_F es la eficiencia de Faraday, para calcular la eficiencia Faraday utilizamos la siguiente ecuación.

$$\eta_F = 96.5 \exp(0.09/i_e - 75.5/(i_e^2)) \quad (19)$$

La eficiencia de Faraday es la relación entre la cantidad actual y la cantidad máxima de hidrógeno producido en el electrolizador, asumimos una temperatura de operación del electrolizador de 40°C.

Las ecuaciones dadas anteriormente son un modelo simple de electrolizador en la que asumimos que el electrolizador tiene un sistema independiente de enfriamiento para mantener una temperatura de 40°C.

Para liberar el hidrógeno y oxígeno del agua se necesita utilizar normalmente agua destilada, debido a que esta no contiene iones y tiene muy baja o casi nula conductividad, una característica del agua destilada es que puede ser calentada por sobre su punto de ebullición sin que esta hierva.

- **Ultra-capacitor**

El ultra-capacitor es utilizado para compensar las variaciones repentinas de voltaje y corriente en la carga, debido a que este es un dispositivo que tiene energía almacenada y tiene una construcción parecida al de una batería, metido en un electrolito y un separador entre los electrodos.

El área de los electrodos usados para fabricar los ultra-capacitores son de 500-2000 m^2/g , que es mucho más grande que el área de los electrodos de una batería. Los electrolizadores son usados en aplicaciones en las que se necesite picos de potencia de corta duración.

La capacitancia de un electrolizador puede variar de 10 a 2700 F y las corrientes de fuga pueden ir de 10 – 50 mA, para el sistema híbrido se seleccionó el módulo MAXWELL (Maxwell.com, s.f.) 435F, 14V, necesitan ser conectados 4 de los módulos para obtener un voltaje nominal de 56V, cada uno de los módulos tiene una resistencia en serie de 4mΩ y una corriente de fuga de 10mA.

Para esta simulación la corriente de fuga fue asumida como constante, para modelar el ultra capacitor usamos un capacitor en serie con una resistencia, cada capacitor tiene una capacitancia de 28.19 μF .

Conectando cuatro ultra-capacitores en serie se tendrá una capacitancia total de 108.75 μF y una resistencia de 16 mΩ, que estará conectado en paralelo a la pila combustible.

El ultra-capacitor puede ser modelado con la función de transferencia que tenemos a continuación.

$$\frac{V_{ucap}}{V_{Fcell}} = \frac{s+1/R_C C}{s\left(1+\frac{R_S}{R_C}\right)+1/R_C C} \quad (20)$$

Debido a que Simulink permite utilizar los componentes antes mencionados de manera directa se optó por dicha solución como se puede ver en la figura 18.

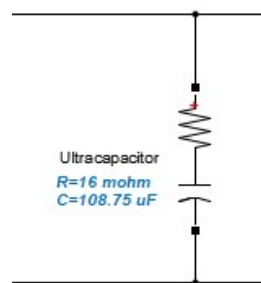


Figura 18. Ultra-capacitor conectado en paralelo a la pila combustible.

Fuente: Autor

Debido a que el voltaje de la pila combustible es relativamente bajo se procede a elevarla mediante un convertidor elevador a 120VDC utilizando el ciclo Duty, que es generalmente dado por la ecuación

$$\frac{V_{boost}}{V_{ucap}} = \frac{1}{1-D} \quad (21)$$

Para el inversor se usó un Universal Bridge de la librería de Simulink, y teniendo como salida 120Vac a una frecuencia de 60Hz, se utilizó un generador de pulsos PWM con una onda portadora de 1.08KHz usando también la opción fase simple, puente completo de 4 pulsos.

- Controladores.

Los controladores PID son usados para controlar la caudal de hidrógeno y oxígeno de acuerdo al nivel de voltaje que tenga la pila combustible, cuando el voltaje de la pila combustible baje más de 48v el controlador permitirá el paso de un mayor caudal de hidrógeno y oxígeno para estabilizar el voltaje y la corriente.

La función de transferencia general para los controladores PID puede ser descrito de la siguiente manera.

$$G_r(s) = \frac{Kp\left(s+T_d s^2+\frac{1}{T_i}\right)}{s} \quad (22)$$

Son usados limitadores en la salida de cada controlador para limitar la presión del gas en la pila combustible.

*Tabla 2. Parámetros de controladores de flujo de pila combustible
Fuente: Autor*

	Kp	Ti	Td
Flujo O2	2,17	0,5	0
Flujo H2	5	0,5	0

Tanque de almacenamiento de hidrógeno.

Para realizar el cálculo de la cantidad de hidrógeno que se guardará en los tanques se necesita la diferencia entre la cantidad producida y la consumida y eso será lo que se almacene en el tanque, y se puede representar con la siguiente ecuación el cual calcula la presión del hidrógeno directamente.

Todos los equipos auxiliares como válvulas, bombas, ventiladores o motores de compresión son ignorados en el modelo dinámico.

$$P_b - P_{bt} = z \frac{N_{H2} RT_b}{M_{H2} V_b} \quad (23)$$

Con la ecuación 24 se puede calcular la eficiencia de la pila combustible en donde V_s es el voltaje de salida de la pila combustible y E es el voltaje teórico. (Marin Calle, 2017)

$$\eta_{stack} = 0.83 * \frac{V_s}{E} \quad (24)$$

Cálculo de banco de baterías.

Para realizar al cálculo del banco de baterías se tomó en cuenta la potencia de consumo del electrolizador; el banco de baterías entra en funcionamiento cuando el sistema de generación eólica no cuente con la velocidad adecuada para su funcionamiento, por lo cual este debe alimentar el electrolizador para generar el hidrógeno necesario que necesita la pila combustible.

Potencia de carga:

La potencia de consumo del electrolizador es de 200 w, y se da como tiempo de autonomía un periodo de 3 horas, por tanto

$$200 \text{ W} * 3 \text{ horas} = 600 \text{ Wh}$$

Identificamos la profundidad de descarga de la batería, tomando en cuenta que una batería no debe descargarse por debajo del 40%. Por lo tanto, su capacidad debe ser un 40% más de lo que necesita la carga, este porcentaje la convertimos a decimales 0.40.

$$1.4 * 600 \text{ Wh} = 840 \text{ Wh}$$

Si se considera la media de temperatura con la que trabaja la batería, se debe tener en cuenta que la energía que entregue esta no será igual a 25 °C que a 0 °C. (Cavasassi)

40°C	102% de capacidad
25°C	100% de capacidad
0 °C	85% de capacidad
-15°C	65% de capacidad

Como la temperatura promedio en la localidad es de 25°C la capacidad será del 100% entonces realizamos la siguiente operación.

$$840 * 1 = 840 \text{ Wh}$$

A continuación, procedemos a dividir la potencia para el voltaje de la batería, con lo cual obtendremos la corriente que necesitaremos

$$840 \text{ Wh}/12 \text{ volts} = 70 \text{ Ah}$$

Por lo que se realizó un arreglo de 4 baterías de 12 vDC conectadas en serie, para obtener un voltaje total de 12 vDC, cada batería tiene una capacidad de 70 Ah que deberán abastecer los 200 w que necesita el electrolizador durante el tiempo de autonomía que se desea.

Cálculo de tiempo de carga:

Para calcular el tiempo de carga de la batería, utilizamos la ecuación 25 que toma en cuenta la capacidad de almacenamiento de energía que tiene la batería en (Ah) y la capacidad de corriente del cargador en (A), con lo cual podemos obtener un tiempo estimado que tomará cargar la batería.

$$T_c(h) = C_b(\text{ah}) / C_c(\text{A}) \quad (25)$$

T_c = Tiempo de carga (h)

C_b = Capacidad de batería (Ah)

C_c = Capacidad de cargador (A)

Entonces si tenemos una corriente de 5A.

$$T_c = 70 \text{ Ah} / 5 \text{ A}$$

$$T_c = 14 \text{ h}$$

3.2. Estrategias de control de energía del sistema propuesto

La figura 18 muestra el diagrama de bloques donde se puede apreciar la estrategia de control del sistema, en la que se tendrá las siguientes condiciones de operación.

Primer caso:

Si la potencia de la carga (P_{carga}) sobrepasa la potencia de la turbina a viento (P_{viento}) y la potencia de la batería ($P_{\text{batería}}$) la pila combustible actuará. Por lo tanto, la suma de las potencias se tendría de la siguiente manera.

$$P_{carga} = P_{viento} + P_{batería} + P_{FC}, P_{sis} < 0 \quad (26)$$

Segundo caso:

Si la potencia generada por la turbina a viento más la obtenida del banco de baterías excede la potencia de demanda de la carga, la potencia excedente será entregado al electrolizador, por lo tanto, la suma de las potencias quedaría de la siguiente manera.

$$P_{elec} = P_{viento} + P_{batería} - P_{carga}, P_{sis} > 0 \quad (27)$$

Tercer caso:

Si la generación de energía por medio del viento más la energía obtenida del banco de baterías es igual a la que requiere la carga, entonces toda la energía generada irá directamente a la carga, teniendo la siguiente ecuación de potencias.

$$P_{load} = P_{viento} + P_{batería}, P_{sis} > 0 \quad (28)$$

3.3. Diagrama de flujo de sistema híbrido Eólico-Pila combustible

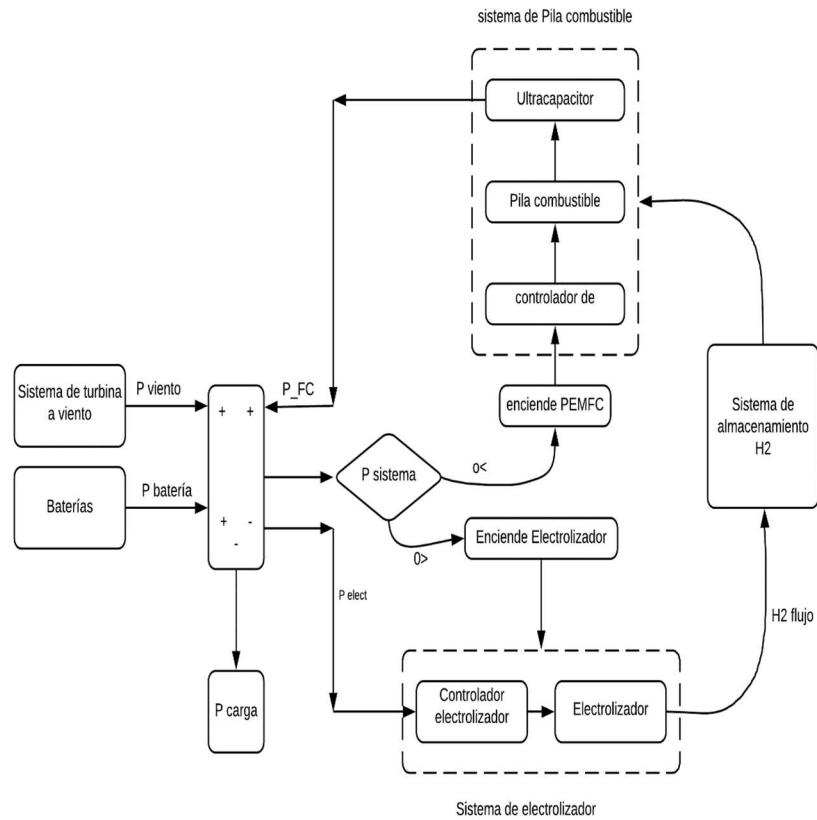


Figura 19. Diagrama de flujo del esquema de control del sistema híbrido eólico pila combustible.
Fuente: Autor

Como se puede observar en el diagrama de flujos del sistema (Figura 19), en el controlador se suman las potencias obtenidas de la pila combustible, turbina a viento y batería, mientras que se restan las potencias consumidas por la carga y por el sistema del electrolizador, recordando que el electrolizador necesita energía para poder producir el hidrógeno que necesita el sistema de la pila combustible.

CAPÍTULO 4

4) RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK Y DATOS EXPERIMENTALES.

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones llevadas a cabo en el programa, y se muestra con capturas de pantalla las diferentes curvas de potencias, voltajes, corrientes, producción de hidrógeno, oxígeno, variaciones de carga, temperaturas, etc.

4.1. Perfiles de viento obtenidos de sistema de medición HOBO en el Centro de Energías Renovables para validación.

Se realizaron mediciones de velocidades de viento, ráfagas de viento y la dirección para en base a esos datos realizar simulaciones, pero las velocidades obtenidas de las mediciones de la estación meteorológica son demasiado bajas como para poder mantener generando la turbina a viento, se da a continuación las gráficas con las curvas de viento.

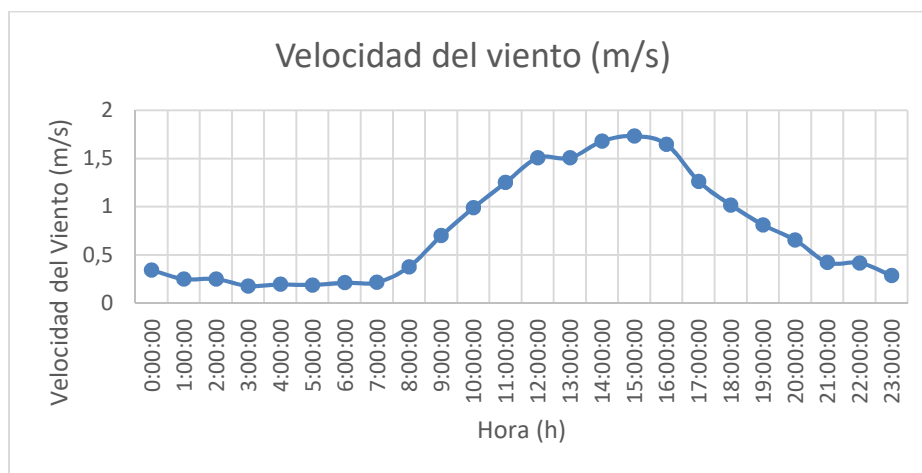


Figura 20. Velocidad promedio de viento durante un día en el mes de febrero 2018.
Fuente: Laboratorio del Centro de Energía Renovables CER

Se recogieron los datos durante un periodo de 2 meses, febrero y marzo, se puede observar en los resultados de las mediciones en las figuras 20 y 21 una velocidad de viento promedio demasiado baja, teniendo apenas 1.6 m/s 2.08 m/s de velocidad de viento máxima promedio, en febrero y marzo respectivamente.

Los datos obtenidos del HOBO son cada minuto, por lo que se hace un promedio por hora y por día para presentar las gráficas que hemos mostrado.

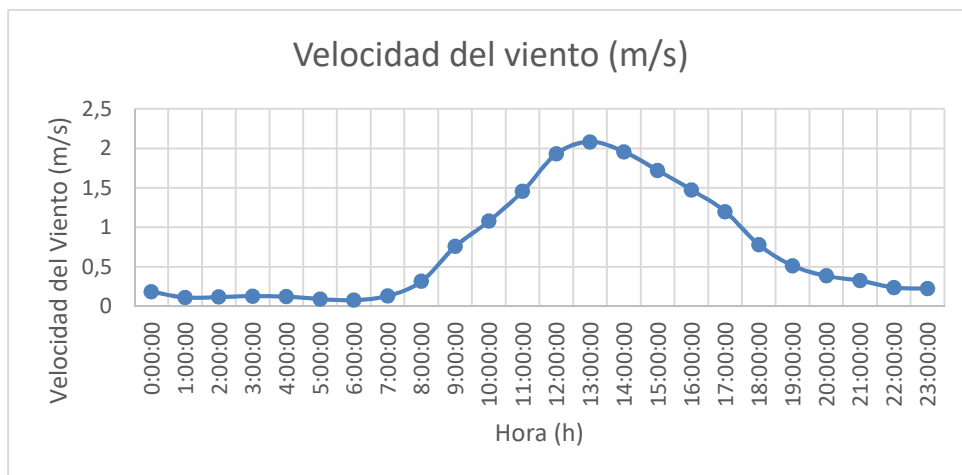


Figura 21. Velocidad promedio de viento durante un día en el mes de marzo 2018.
Fuente: Laboratorio del Centro de Energía Renovables CER.

La velocidad máxima promedio de ráfagas de viento fue de 3.59 m/s durante el mes de marzo, y la velocidad máxima registrada fue el día 2 de marzo a las 13:49 horas, teniendo una velocidad de 4.78 m/s, pero con muy corta duración.

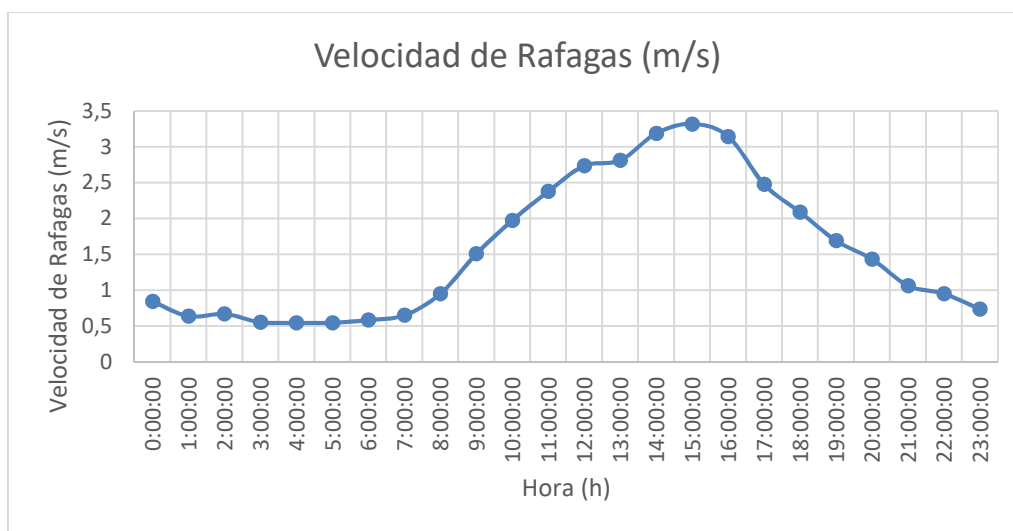


Figura 22. Velocidad promedio de ráfagas durante el mes de febrero 2018
Fuente: Laboratorio del Centro de Energía Renovables CER

Como se puede observar en la figura 23 las ráfagas de viento se obtuvieron durante el mes de marzo, donde el promedio máximo fue de 3.6 m/s durante el mediodía, y teniendo las ráfagas más bajas

durante los periodos comprendidos en la madrugada y la mañana obteniendo velocidades de ráfaga de 0.3 m/s.

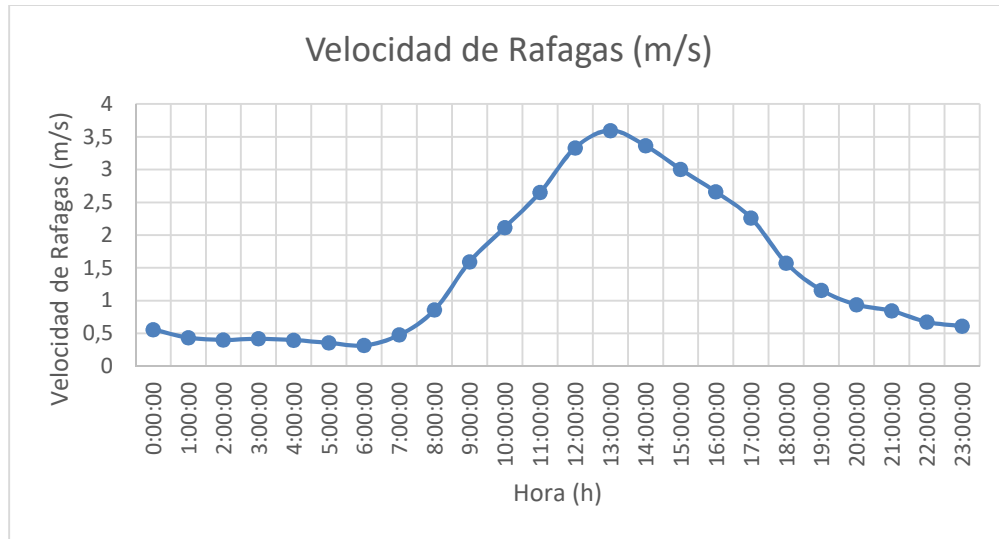


Figura 23. Curva de ráfagas de viento promedio diario durante el mes de marzo 2018
Fuente: Laboratorio del Centro de Energía Renovables CER

4.2. Resultados de la simulación dinámica del sistema híbrido eólico-pila combustible.

Para comprobar si el programa realizado cumple a cabalidad con lo que estaba destinado a hacer, se ha realizado la simulación y también se realizaron pruebas de laboratorio para comparar el comportamiento tanto del sistema simulado y medido.

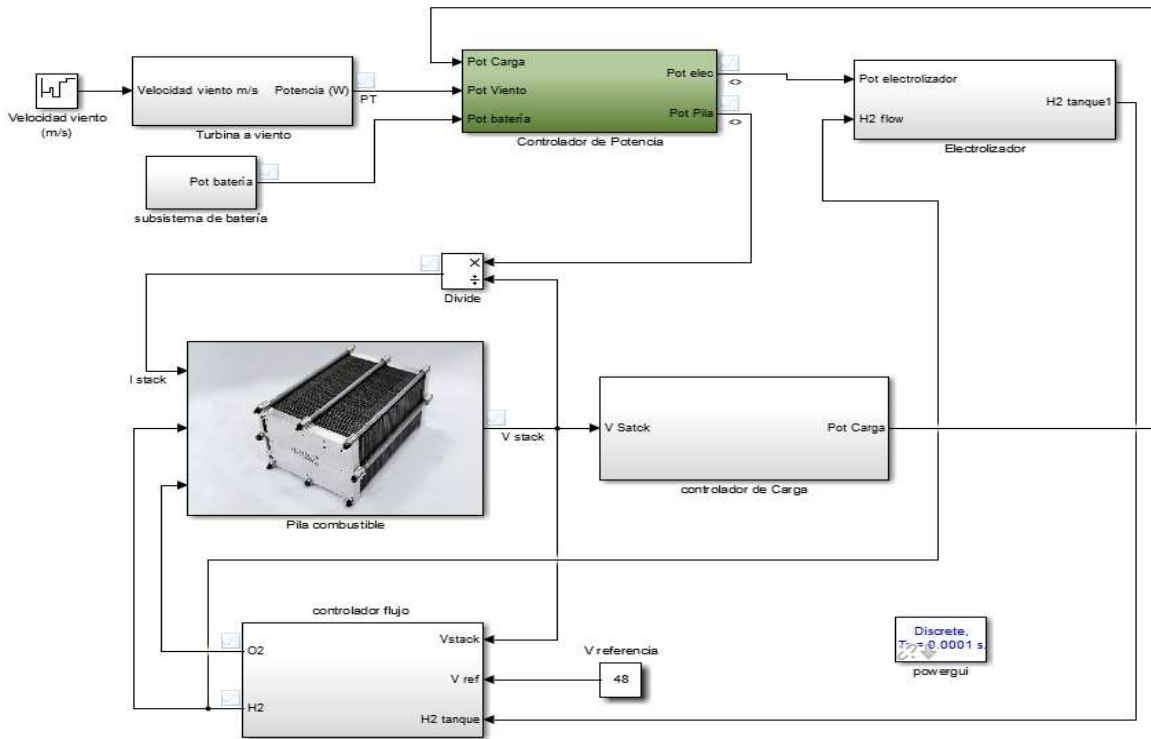


Figura 24. Sistema híbrido modelado en Simulink Matlab
Fuente: Autor.

En la figura 24 se puede observar el sistema modelado en Simulink, a su vez este consta de varios subsistemas, se tiene el subsistema de pila combustible, subsistema de electrolizador, subsistema de controlador de flujo, subsistema de generación eólica, controlador de potencia, banco de baterías.

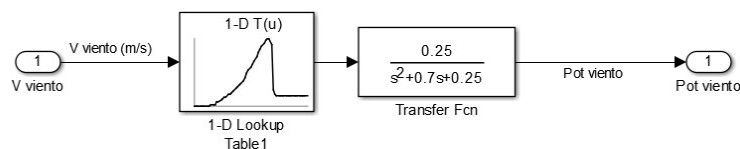


Figura 25. Curva de potencia y función de transferencia de la turbina a viento.
Fuente: Autor

En la tabla 3 se tiene las características más relevantes de la turbina a viento que se utilizó para este proyecto, pudiendo esta obtener una potencia nominal de 400 W con velocidades

de viento de 12.5 m/s como se puede también verificar en la curva de potencia (figura 34), y una potencia máxima de 800 W con una velocidad del viento de 16.54 m/s.

Los rangos de ajuste del regulador tienen 4 opciones, de las cuales se debe elegir las más adecuada de acuerdo el sistema que se esté utilizando, en este caso se utilizó el rango de 48V de salida al controlador.

*Tabla 3. Características de turbina a viento AIR 403
Fuente: Manual (AIR403)*

Especificaciones técnicas de turbina a viento	
Diámetro de rotor	1,17 metros
Peso	13 lb (6Kg)
Velocidad de viento para arrancar	3 m/s
Potencia nominal	400 W en 12,5 m/s
Potencia máxima	800 W en 16.54 m/s
Rangos de ajuste del regulador	12v 13,8v - 17,8v Preestablecido a 14,1v
	24v 27,6v - 35,6v Preestablecido a 28,2v
	36v 41,4v - 53,4v Preestablecido a 42,3v
	48v 55,2v - 71,2v Preestablecido a 56,4

Debido a que la simulación consta tanto de partes de Simulink como de SimPowerSystems es necesario incluir en la simulación un bloque de Powergui, en este bloque se puede configurar para poder tomar datos (muestreo) de 3 diferentes formas, Continuous, Discrete y Phasor; en esta simulación se ha tomado la opción de “Discrete” debido a que si se utiliza la opción de “Continuous” al tener que procesar demasiados datos el sistema se vuelve lento, con “Discrete” se puede configurar la cantidad de muestras que queremos que sean tomados, esto puede afectar un poco las gráficas de los resultados pero no es mucha la diferencia.

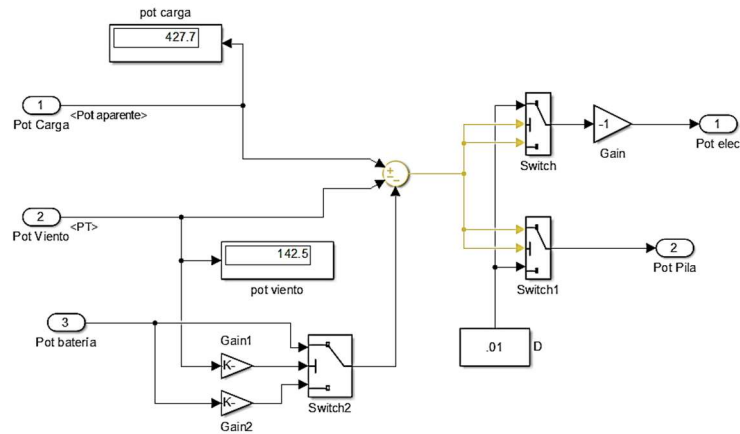


Figura 26. Subsistema de controlador de potencia.

Fuente: Autor

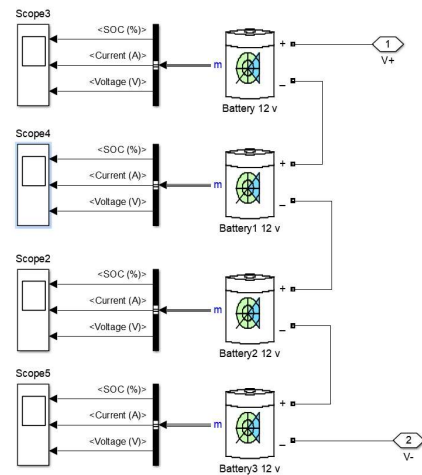


Figura 27. Subsistema de banco de baterías en serie.

Fuente: Autor.

En la figura 26 está representado el controlador de potencia, en este subsistema se recibe todas las potencias como una referencia, recibe la potencia del viento, potencia del banco de baterías, potencia de consumo de la carga, y tiene como salidas las señales para que actúen ya sea la pila combustible o el electrolizador dependiendo de la situación, tal como se puede ver en las estrategias de control.

El banco de batería está conformado por 4 baterías en serie de 12 VDC como se puede ver en la figura 27 son de 70 Ah cada una, obteniendo un voltaje total de 48 V nominal que estará conectado al controlador de potencia, el banco de baterías entregará potencia al electrolizador cuando no haya viento para la generación por medio de la turbina.

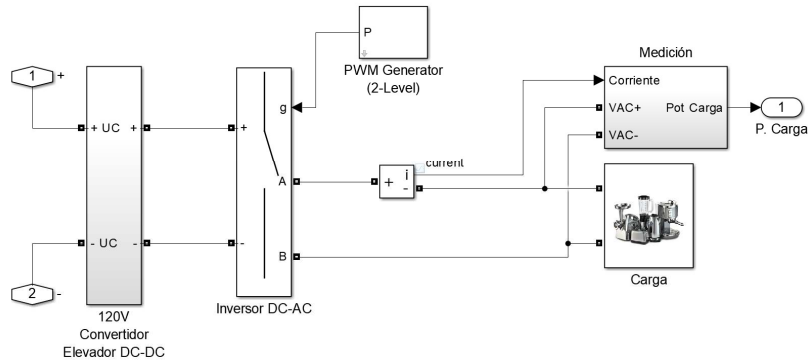


Figura 28. Convertidor elevador DC-DC / Inversor DC-AC / Carga eléctrica
Fuente: Autor

Para modelar el ultra-capacitor se ha utilizado el módulo Maxwell 435 F de 14V, estos son conectados en serie para obtener el voltaje del rango de trabajo de la pila combustible. El ultracapacitor puede ser representado como en la figura 17 en la que tenemos una resistencia y un capacitor. cada ultracapacitor tiene una resistencia interna de $4\text{m}\Omega$, como se tienen 4 conectadas en serie se tiene una resistencia total de $16\text{m}\Omega$, y una capacitancia total de 108.75 uF además para este caso se consideró una corriente de fuga constante en el tiempo de 10mA .

Tabla 4. Tabla de datos de ultra-capacitor
Fuente: www.maxwell.com

Ultra-capacitor	
Capacitancia (F)	108,75 uF
Resistencia total	16 m Ω
Resistencia de pérdida (Rs)	0.01 Ω
Corriente de fuga	10 mA

En la figura 29 se muestra la carga que está conectada al voltaje alterno del sistema, las resistencias son variables en el tiempo y se activan de acuerdo a la tabla 4, mientras la carga inductiva de 100mH se mantiene constante.

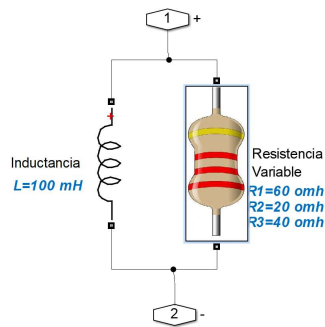


Figura 29. Carga conectada al voltaje AC
Fuente: Autor

En la tabla 5 se puede ver los tiempos de activación y desactivación de las resistencias que forman parte de la carga del sistema, la carga está compuesta por 3 resistencias conectadas en paralelo a una inductancia de 100mH (figura 29), la resistencia R1 se prenderá durante los periodos de tiempo comprendidos entre 0 a 20 segundos y 60 a 75 segundos, la resistencia R2 de 20 a 25 segundos y 75 a 85 segundos, mientras que la resistencia R3 de 25 a 60 segundos y 85 a 100 segundos.

Tabla 5. Tabla de periodos de activación y desactivación de resistencias
Fuente: Autor

	T1 (s)	T2 (s)	T3 (s)	T4 (s)	T5 (s)	T6 (s)
R1 (60 Ω)	0-20			60-75		
R2 (20 Ω)		20-25			75-85	
R3 (40 Ω)			25-60			85-100

En la figura 28 se puede observar la representación del convertidor elevador, el inversor, y la carga variable en el tiempo; los datos de las diferentes partes se pueden observar en la tabla 3 y 6, la potencia medida de la carga se enviará al controlador de potencia, el subsistema de medición tiene medidores de corriente y voltaje, con los cuales usando el bloque POWER se calcula la potencia de la carga que luego es enviado al controlador.

En la figura 30 está representada el subsistema de generación por medio de la pila combustible, teniendo como parámetros de entrada la corriente, flujo de hidrógeno y oxígeno, y obteniendo el voltaje de la pila.

Tabla 6. Datos pila combustible e inversor.

Fuente: Autor.

Datos	
Voltaje Salida inversor	120 v
Frecuencia	60 Hz
Frecuencia Switch PWM	1.08 KHz
Volumen ánodo pila combustible	2 litros
volumen cátodo pila combustible	1 litro
volumen tanque almacenamiento	1 litro
Densidad hidrógeno	0.089 Kg/m ³
Densidad Oxígeno	1.331 Kg/m ³

El convertidor elevador utiliza el ciclo duty (ecuación 21) para elevar el voltaje de salida de la pila combustible (48v-80v) un nivel de 120 VDC, y posteriormente enviar al inversor.

El inversor utilizado es el bloque “Universal Bridge” para convertir el voltaje DC en voltaje AC y dentro de la opción “Power electronic Device” utilizamos un “Ideal Switches”, además el inversor tiene un generador de pulsos PWM de 2 niveles, enviará una señal de 4 pulsos para un puente inversor de onda completa a 120V AC, 60 Hz, la señal de la onda portadora es de 1080 Hz.

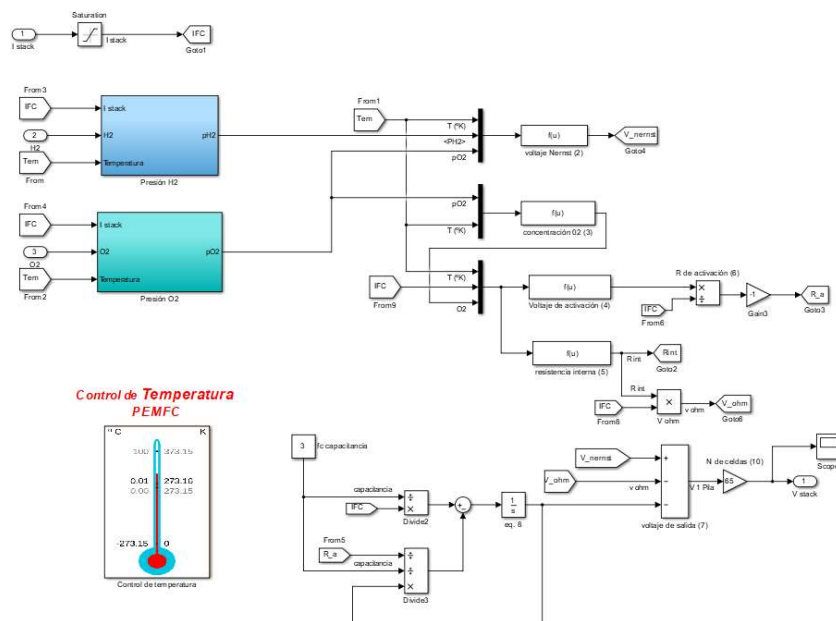


Figura 30. Subsistema de pila combustible

Fuente: Autor

En el sistema de la pila combustible se tiene las diferentes ecuaciones que se mostró en el capítulo anterior las mismas que forman los subsistemas de temperatura, control de presión tanto del oxígeno como del hidrógeno, el voltaje de salida de la pila combustible está entre 48 y 80 voltios, cuando el voltaje baje por debajo de los 48 voltios, el controlador de flujo actuará con lo que permitirá el paso de mayor cantidad de gas de hidrógeno y oxígeno y se aumentará la presión de los mismos debido al aumento del caudal, hasta tener un voltaje mucho más adecuado.

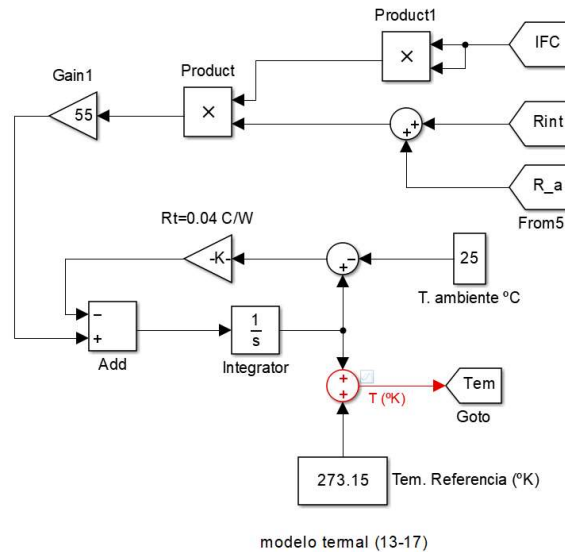


Figura 31. Subsistema de control de temperatura.
Fuente: Autor

La temperatura interna de la pila combustibles dependerá de la corriente generada, la resistencia interna y de la resistencia de activación, multiplicada por el número de celdas conectadas en serie, también se toma en cuenta la temperatura del medio ambiente, que en este caso se tomó como referencia a 25 °C, que es la temperatura ambiente.

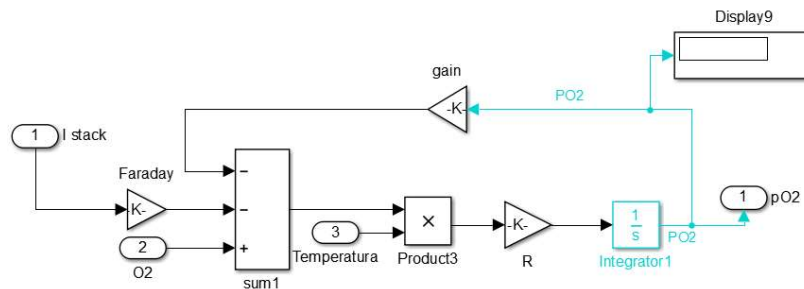


Figura 32. Ecuación de presión de oxígeno de la pila combustible
Fuente: Autor

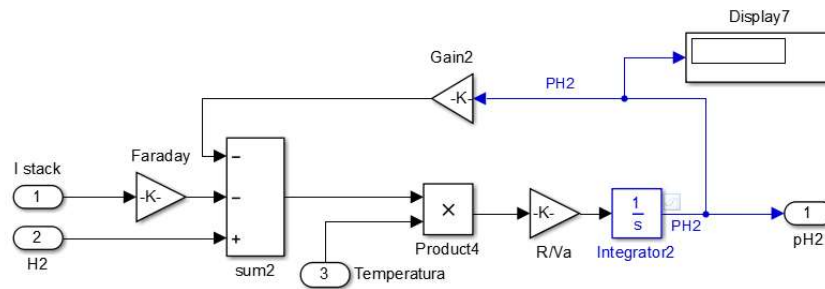


Figura 33. Ecuación de presión de hidrógeno de la pila combustible
Fuente: Autor

En la figura 32 se tiene el sistema para el cálculo de la presión del hidrógeno, variando de acuerdo a la corriente que necesita la carga, mientras más elevada sea la corriente, el caudal del hidrógeno se elevará y por ende la presión también.

En el programa se pueden obtener varias gráficas de los diferentes subsistemas, éstas pueden ayudar a tener una mejor idea de que es lo que está sucediendo en el sistema, para la simulación se utilizaron scopes y también el Simulation Data Inspector.

En la figura 34 se puede observar la relación entre la velocidad del viento y la potencia obtenida, la curva de potencia de viento fue obtenida del fabricante, el diámetro de la turbina es de 1.14 m y tiene una potencia de salida de 400 W cuando la velocidad del viento esté a aproximadamente 12.5 m/s (28mph).

Tabla 7. Tabla de velocidades de viento para simulación
Fuente: Autor

Velocidades	T1 (s)	T2 (s)	T3 (s)	T4 (s)	T5 (s)	T6 (s)
9 m/s	0-20					90-100
12 m/s		20-30				
7 m/s			30-50			
15 m/s				50-70		
17 m/s					70-90	

En la tabla 7 se tiene las velocidades de viento y los periodos en las que están, teniendo velocidades desde 7 m/s hasta 17 m/s, se dieron estos valores y se obtuvieron las curvas de potencia de la turbina a viento que se tiene en la figura 35.



*Figura 34. Curva de Relación Velocidad de viento vs potencia generada
Fuente: Air 403 Power Manual*

En la figura 36 se tienen las potencias con diferentes velocidades del viento, se dieron velocidades de 5.36 m/s, 6.70 m/s, 8.94 m/s, 12.07 m/s, 15.64 m/s, y 17.88 m/s, y se comparó con la curva de potencia obtenida del manual Air 403 Power, con esto se comprueba que los resultados obtenidos están bien, en la figura 35 está el sistema de generación de potencia por medio de la turbina a viento.

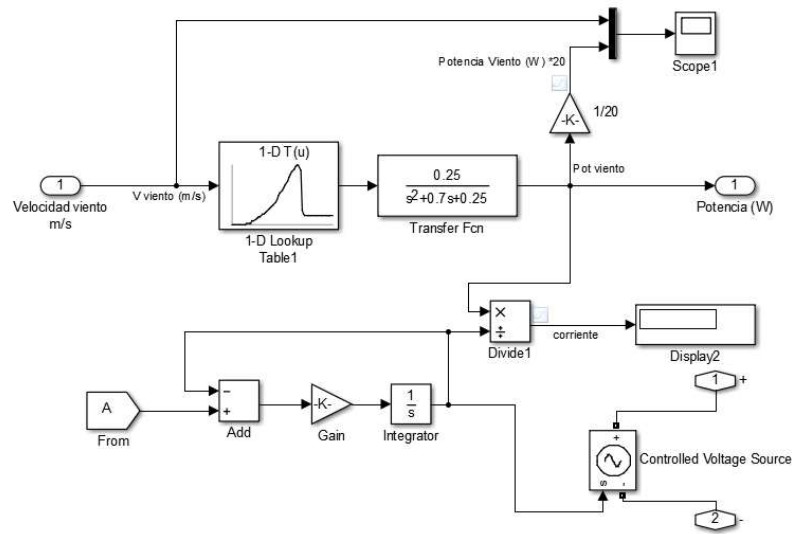


Figura 35. Subsistema de turbina a viento

Fuente: Autor

Cuando la velocidad del viento supere los 18 m/s el sistema de protección de la turbina actúa, bloqueando las palas para que no haya sobre revoluciones, de esta manera se protege el sistema de fallos.

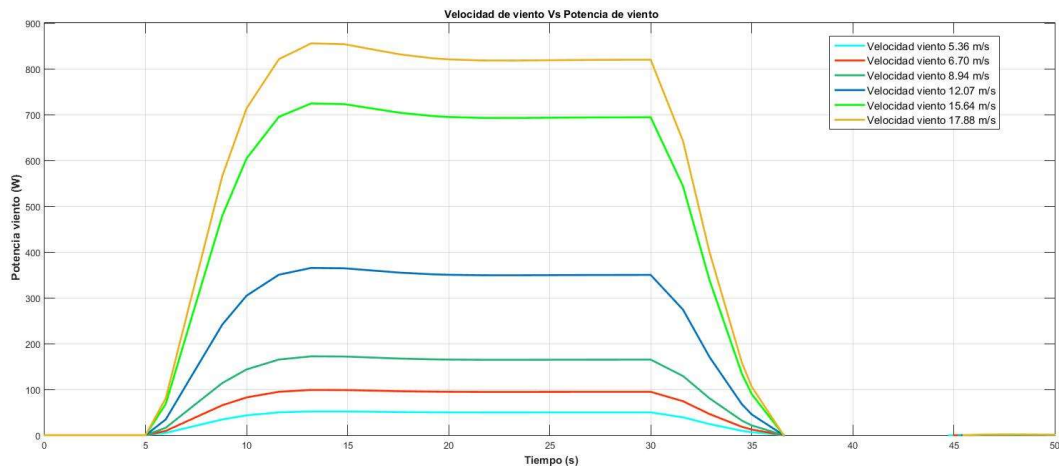


Figura 36. Comparación de potencia obtenida a diferentes velocidades de viento.

Fuente: Autor

En la tabla 6 se tiene los datos de los parámetros de viento, voltajes de salida de inversor, capacidades de volumen de la pila combustible y del tanque de almacenamiento del tanque de hidrógeno.

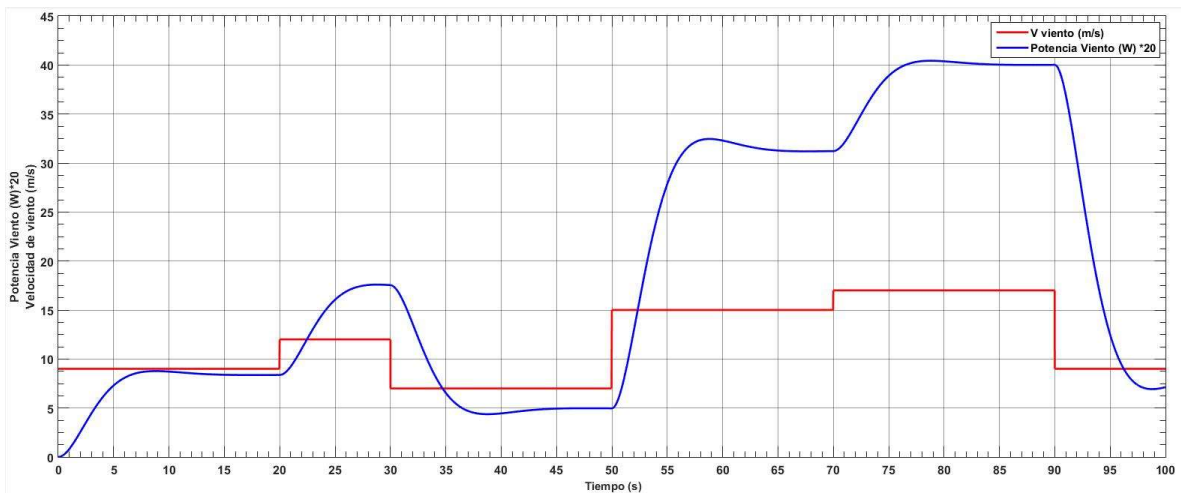


Figura 37 Curva de velocidad de viento vs Potencia Generada en la simulación
Fuente: Autor

En la gráfica de la figura 34 se puede observar la relación que hay entre la velocidad de viento y la potencia generada por la turbina, para la simulación se dio los valores de velocidad de viento de la tabla que se ha dado en la tabla 7.

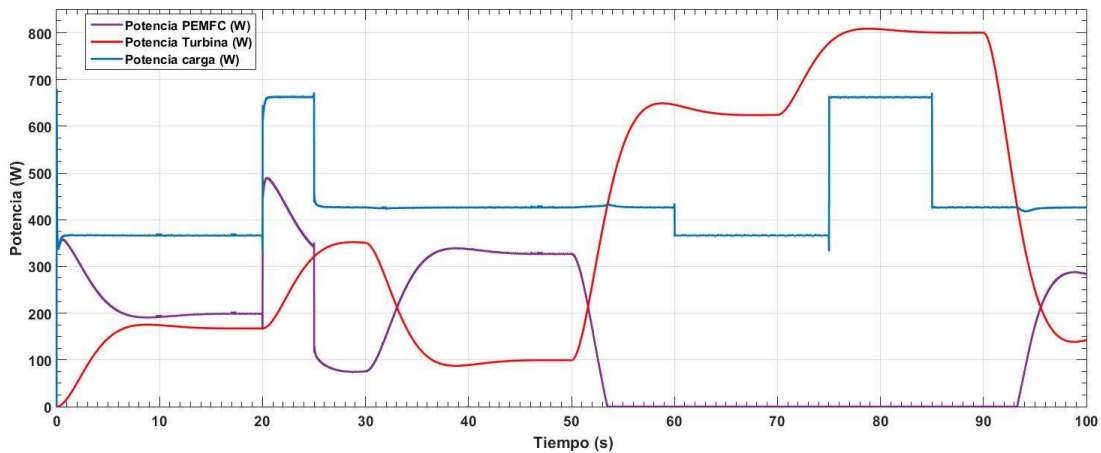


Figura 38. Comparación de las potencias en el controlador
Fuente: Autor

En la figura 38 se puede observar la comparación entre las potencias de la carga, pila combustible, y turbina a viento; como se puede observar la potencia de la pila generará lo necesario para proveer la diferencia de potencia entre la carga y la turbina a viento.

La potencia de carga que se representa en la figura 38, la transformamos en energía multiplicando por el periodo estimado de uso en horas durante un día, en este caso se estimo un periodo de horas tomando en cuenta que ciertos aparatos eléctricos que se tienen en una vivienda promedio no se utiliza todo el día, el sistema hibrido en cuestión puede

abastecer una demanda de energía de 2000Wh durante un periodo constante de 3 horas con una potencia de carga de 650 W sin problema teniendo una potencia nominal de 400W en la turbina , por cuestiones lógicas en una vivienda nunca se tiene conectada un artefacto constantemente, estas se prenden por distintos periodos dependiendo de las necesidades como se puede ver en el Anexo 4.

Se puede observar que en los segundos 20,25,60,75, y 85 hay un cambio repentino de la potencia de la carga, eso es debido que las resistencias en la carga están programadas para cambiar en esos instantantes de tiempo como se puede ver en la tabla 5.

En la figura 38 vemos que el controlador de potencia adecúa el sistema para que la potencia de carga sea abastecida por los sistemas de la pila combustible y turbina a viento por lo tanto las potencias serán como se puede observar en la tabla 8 a en los diferentes rangos de tiempo.

Tabla 8. Comparación de potencias de carga, viento y PEMFC en distintos tiempos
Fuente: Autor

	Potencia (W) (15,3s)	(%)	Potencia (W) (22s)	(%)	Potencia (W) (45.2s)	(%)
Carga	365,1	100	662,6	100	426,7	100
Viento	167,3	45,82	221	33,35	98,8	23,15
PEMFC	197,8	54,18	441,6	66,65	327,9	76,85

Como se puede ver en la figura 38 en el segundo 54 la potencia generada por la turbina a viento excede a la potencia de la carga, por lo tanto la pila combustible no genera nada y la carga es alimentada completamente por la turbina a viento. La potencia excedente es utilizada en el electrolizador para la generación de hidrógeno y posterior almacenamiento en los tanques.

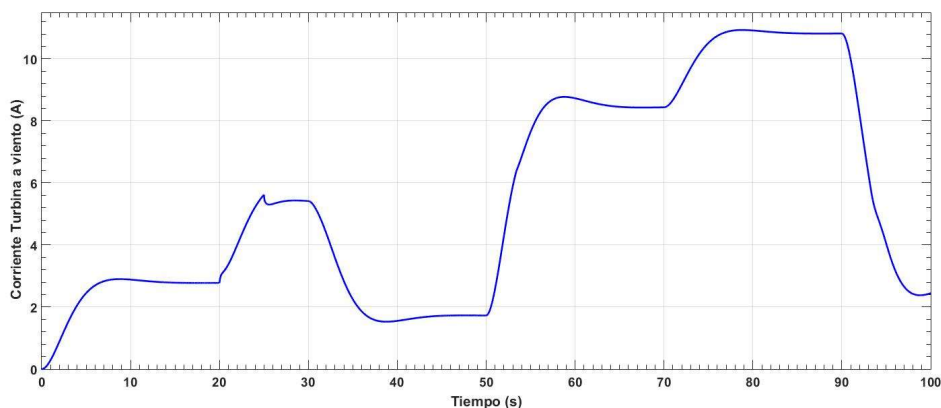


Figura 39. Corriente de salida de turbina a viento en simulación.

Fuente: Autor

En la figura 38 vemos que los cambios de corriente de salida de la turbina a viento, se puede apreciar que la tendencia es parecida a la potencia de salida. Las variaciones de corriente se presentan cuando hay cuando hay un cambio en la velocidad del viento teniendo una corriente de 2.9 A hasta los 20 segundos con una velocidad de 9 m/s, en ese momento hay una elevación de la velocidad a 12 m/s por ende la corriente tiende a subir hasta los 5.4 A, en el segundo 30 la velocidad del viento es de 7 m/s y la corriente de 1.7 A, en el segundo 50 la velocidad del viento se eleva nuevamente hasta los 15 m/s por lo cual la corriente de salida es de 8.4 A, en el segundo 70 la velocidad del viento es de 17 m/s con lo cual la corriente se eleva hasta los 10.8 A, siendo este la corriente máxima de la turbina a viento en la simulación, desde el segundo 90 la velocidad cambia a 9 m/s y la corriente bajas a 2.9 A.

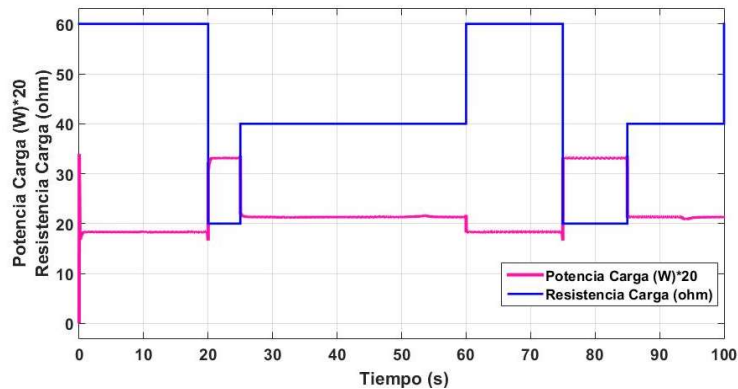


Figura 40. Cambio de resistencia de la carga

Fuente: Autor

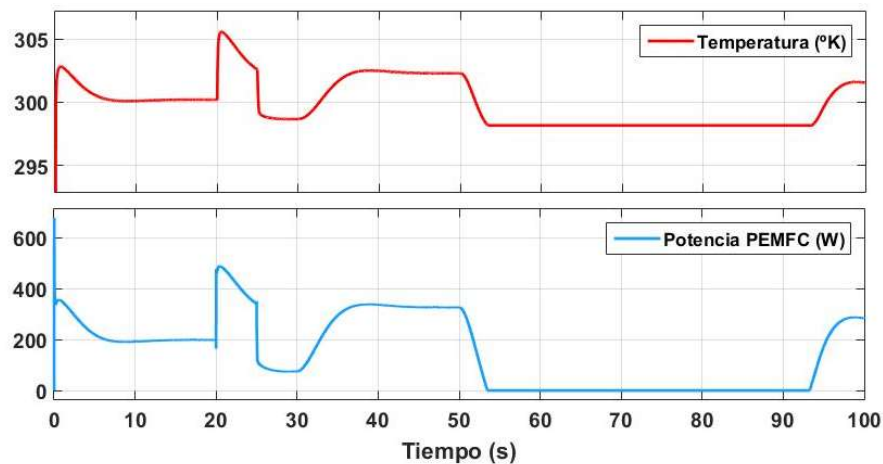


Figura 41. Cambio de temperatura en la pila combustible en simulación, respuesta al cambio de carga.

Fuente: Autor

En la figura 41 se puede observar las diferentes temperaturas de la pila combustible, en respuesta a los cambios de la carga y la corriente que debe ser suministrada, como se puede observar los cambios en la temperatura son relativamente bajos, y se puede apreciar que cuando la pila no está en funcionamiento (desde $t=55s$ hasta $t=94s$) la temperatura se mantiene igual a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, que es la temperatura ambiente.

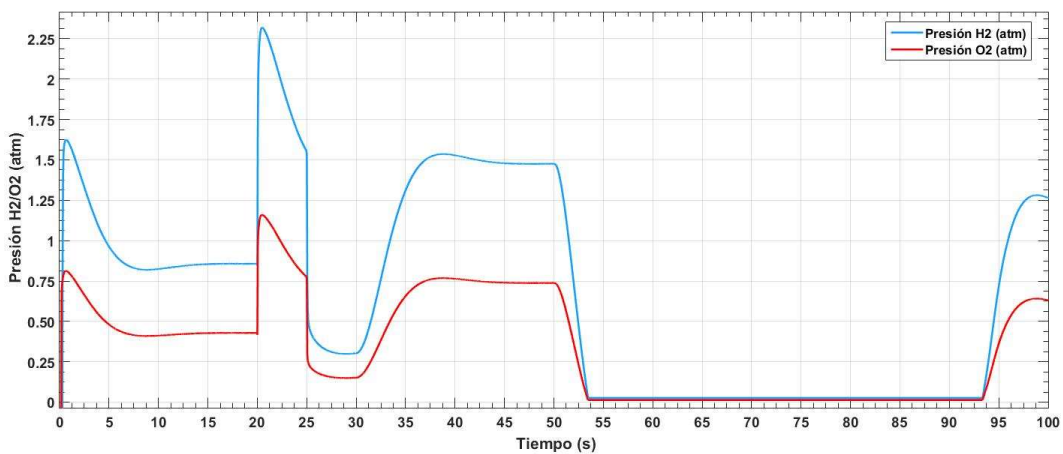


Figura 42. Presión de hidrógeno y oxígeno en simulación en pila combustible

Fuente: Autor

En la figura 42 se muestra la variación que hay en la presión del hidrógeno y oxígeno dentro de la pila combustible, desde el tiempo $0s$ hasta $54s$ la presión varía dependiendo de la corriente que tenga que generar, durante el periodo de tiempo entre $54s$ y $94s$ no hay generación en la pila combustible por lo tanto no hay hidrógeno pasando por la misma.

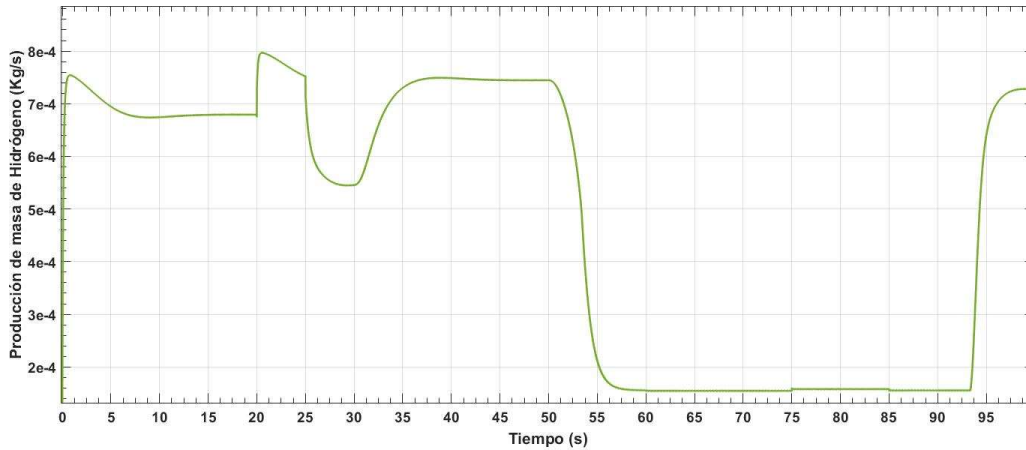


Figura 43. Masa de hidrógeno producido por el electrolizador
Fuente: Autor

en la figura 43 muestra la cantidad de hidrógeno generado que es entregado a la pila combustible para la generación de electricidad, esta aumenta cuando la pila combustible necesita generar mas energía y baja cuando la generación de la pila es baja.

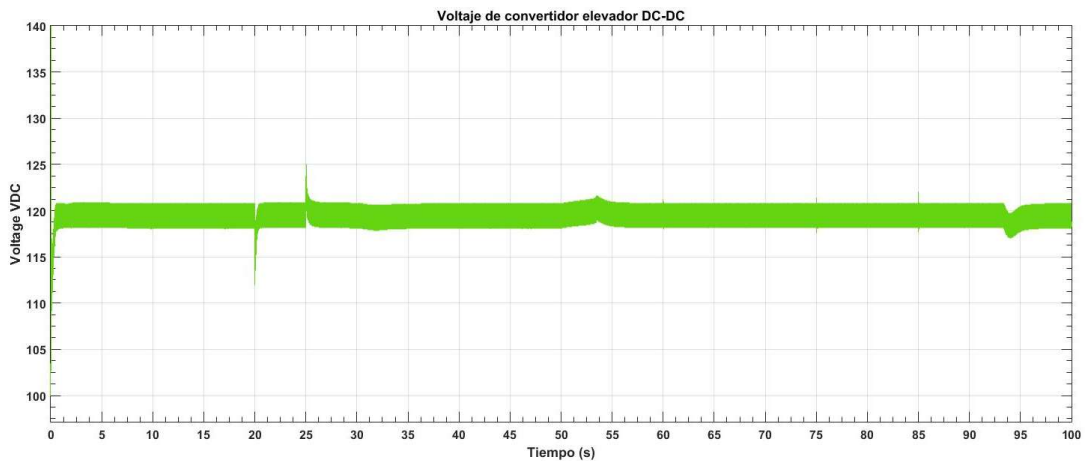


Figura 44. Voltaje DC de salida de convertidor elevador 120V

Fuente: Autor

Como se puede ver en la figura 43 la salida de voltaje del convertidor elevador, presenta ligeras caídas o elevaciones de voltaje repentinas durante la simulación, esto debido a que hay cambios de carga en eso instantes, pero el voltaje se reestablece instantaneamente.

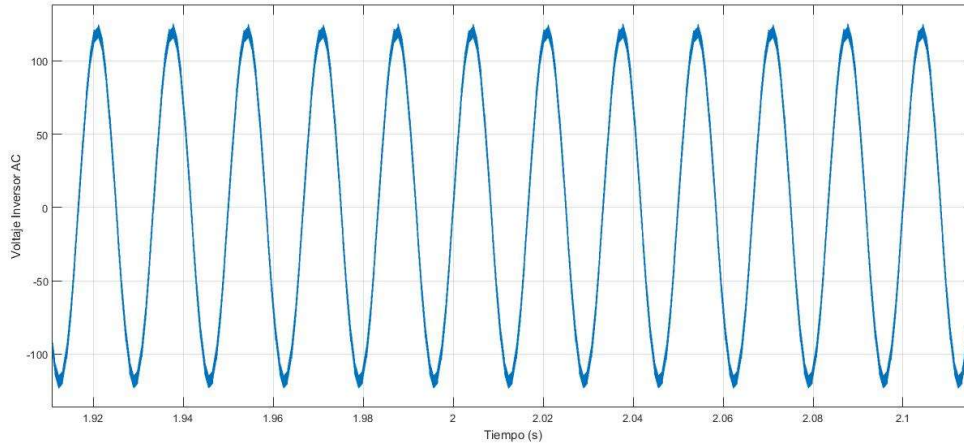


Figura 45. Salida de voltaje de inversor en corriente alterna.

Fuente: Autor

En la figura 43 se puede observar la salida de voltaje del inversor a 120V y 60Hz, esta señal tiene forma senoidal, en el segundo 25 la corriente de salida del inversor baja cuando la resistencia de la carga sube.

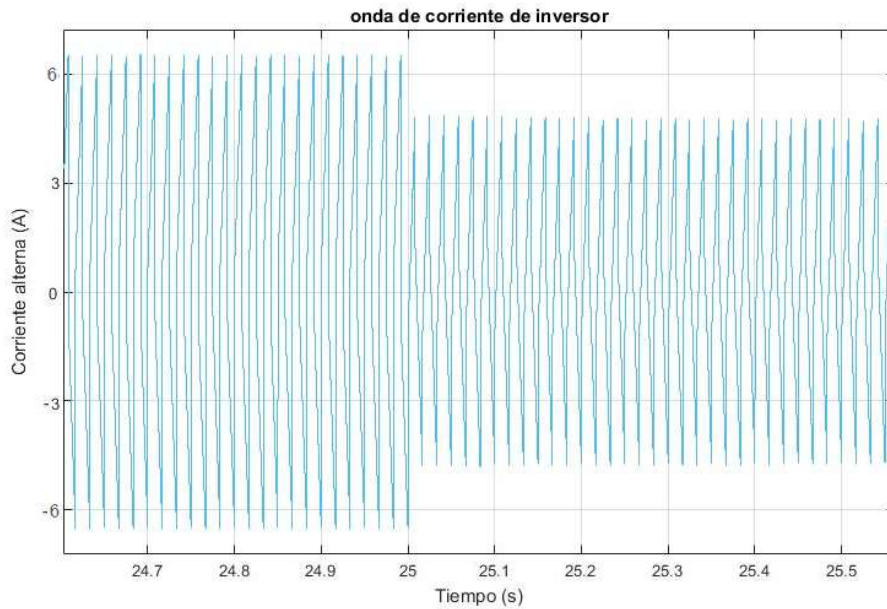


Figura 46. Salida de corriente de inversor a la carga.

Fuente: Autor

En la figura 47 la corriente de la carga y la variación en los instantes que hay cambio de resistencia (figura 40), la corriente de la carga es suministrada en parte por el sistema de la turbina a viento y la otra parte por la pila combustible.

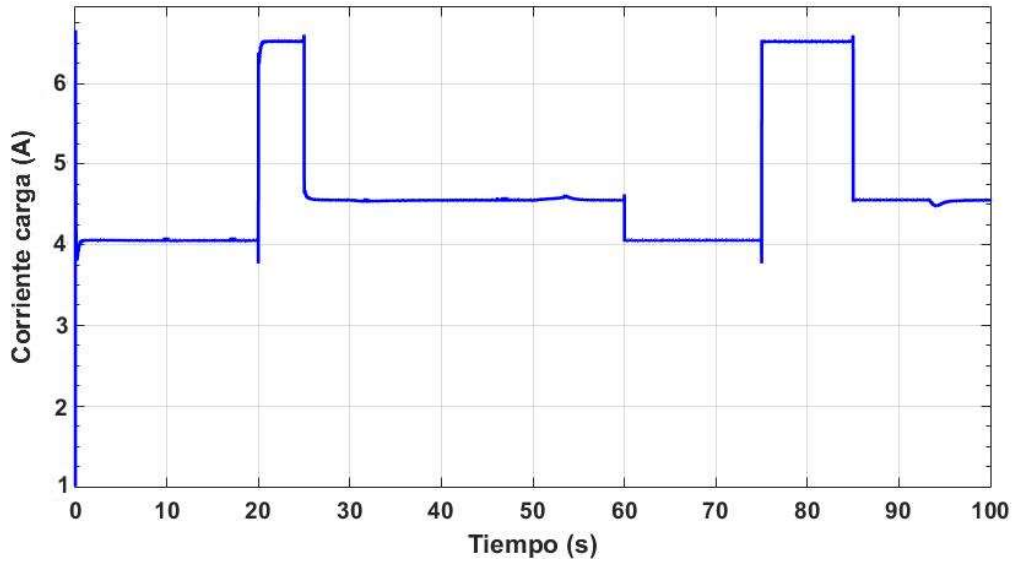


Figura 47. Corriente de la carga
Fuente: Autor

En la figura 47 se tiene la gráfica de la corriente de la carga, la corriente varía de 6A a 10.5A en el segundo 20 y en el segundo 25 cambia de 10.5 A a 7A, la corriente vuelve a bajar debido al cambio de la carga en el segundo 60.

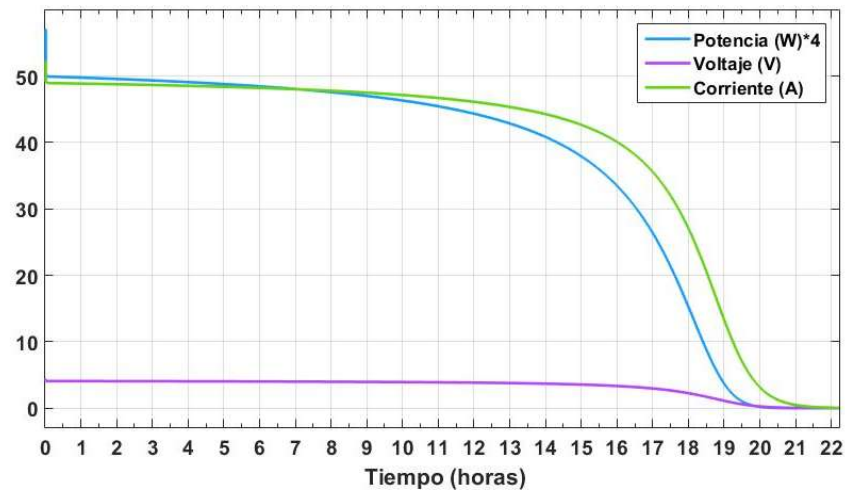


Figura 48. Duración de batería sin generación de turbina a viento
Fuente: Autor

En la figura 48 se puede ver la curva de descarga de la batería, la batería puede soportar la carga constante durante los 14 horas y se descargará en su totalidad en un periodo de 21 horas, el banco de baterías es un arreglo de 4 baterías en serie de 12 vDC y 70 Ah, el consumo nominal del electrolizador es de 5A a 48 V.

4.3. Comparación y validación de modelo de simulación de PEMFC y datos recogidos de mediciones de pila combustible.

En esta sección se realizó experimentos con la pila combustible existente en el Centro de Energías Renovables (CER) y se tomo los datós del manual del J101 JuniorBasic para realizar simulaciones en el programa y hacer comparaciones,y análisis de los resultados obtenidos tanto en el programa como del experimento, los datos obtenidos del manual se presentan en la tabla y

Para tomar los datos experimentales del JuniorBaic se inició desde que se energizó el electrolizador por lo cual el hidrógeno se genera paulatinamente y se comienza a observar como aumenta el voltaje en la pila combustible, hasta llegar a un nivel óptimo con el que pueda arrancar la carga que en este caso es un pequeño ventilador, debido al arranque de de la pequeña carga el voltaje cayó de 0.9V a 0.6v, pero la corriente se mantiene estable como se puede observar en la figura 48.

Para generar hidrógeno el electrolizador necesita una potencia de 1.16 w para una generación rápida, también según las mediciones la corriente mínima para generar una reacción química en el electrolizador y liberar el hidrógeno es de 350 mA, pudiendo soportar hasta 2 A máximo. (Basic, s.f.)

Tabla 9. Datos de electrolizador de J101 JUNIOR Basic
Fuente: Manual J101 JUNIOR Basic

Electrolizador		
Área Activa	4	cm^2
Producción H2	5	cm^3/min
Producción O2	2,5	cm^3/min
Potencia	1,16	W
Voltaje máximo permisible	0-2	$v DC$
Corriente máxima permisible	0-2	$A DC$

Se realizó experimentos manteniendo las condiciones de trabajo del sistema de la pila combustible J101 Junior Basic y cambiando las cargas para realizar las mediciones, las mismas condiciones se han establecido para realizar las simulaciones, se pusieron cargas de 0.3 W y 0.37 W.

Las pruebas con la pila combustible se realizaron con un sensor de voltaje de Arduino (Anexo 5) la cual tiene un rango de error relativamente pequeño, pero debido a los voltajes obtenidos son bastante bajos esto hace que sea bastante variable.

Para el cálculo de la potencia experimental de la pila combustible se utilizaron los datos obtenidos de las mediciones de voltaje y corriente en la pila combustible de monocelda (Anexo 2). Hubo variaciones en las mediciones por lo que se utilizó valores promedios para poder graficar las curvas experimentales.

Para las simulaciones de la pila combustible se tomaron los datos de las tablas de características de la pila combustible J101 JUNIOR Basic cuyos datos se encuentran en las tablas 9 y 10. (Basic, s.f.), la pila combustible se puede ver en los Anexos 1 y 2.

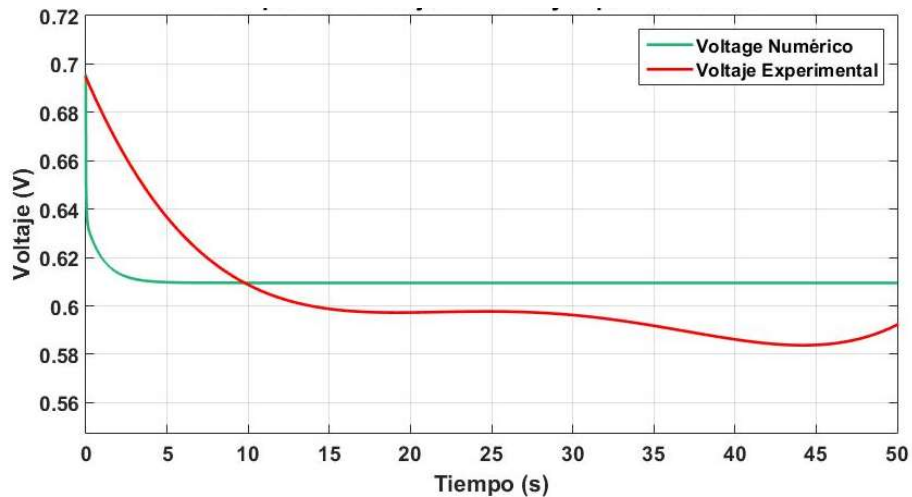


Figura 49. Comparación de voltajes numérico y experimental con una carga de 0.3 W de potencia
Fuente: Autor.

En la figura 48 se tiene una comparación de la caída de voltaje en la pila combustible cuando se conecta la carga de 0.30 W, se puede observar que el voltaje experimental decae por debajo de la curva numérica, pero se restablece y tiene una tendencia parecida en ambas curvas.

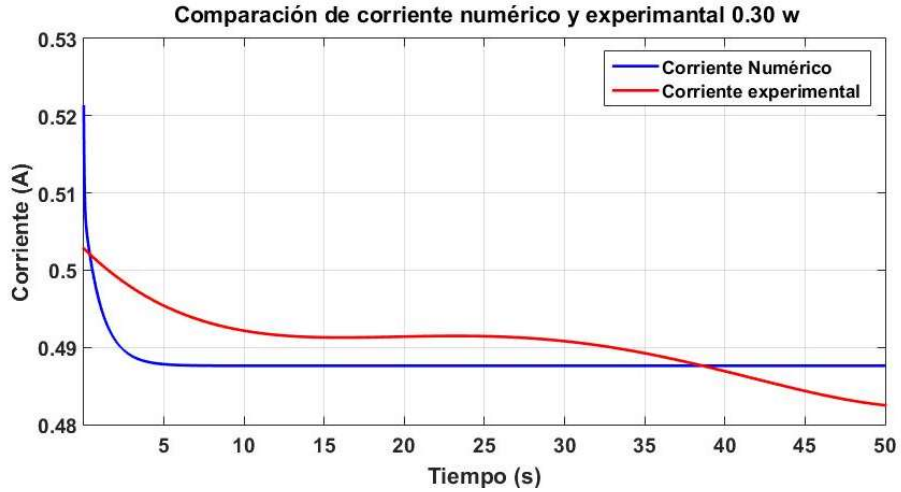


Figura 50. Comparación de caída de corriente con carga de 0.3 W de potencia.
Fuente: Autor.

El voltaje en la curva de cálculo numérico cae hasta los 0.62 V y se mantiene, mientras que en la curva de voltaje experimental hay variaciones, estas se deben al error de medida en los sensores.

En la figura 49 se puede ver que la corriente tiene una caída con respecto al tiempo en ambas curvas, en la curva de corriente numérico cae hasta los 0.487 A mientras que la corriente experimental tiene ciertas variaciones que se le puede adjudicar al error de medida de los sensores.

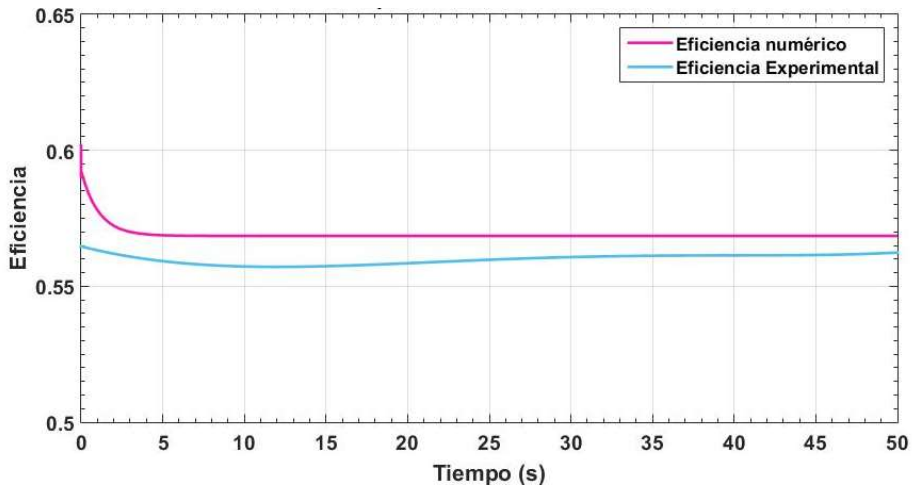


Figura 51. Comparación de eficiencia con datos experimentales y simulación, con una carga de 0.3 W.
Fuente: Autor.

En la figura 50 se puede ver una comparación entre la eficiencia calculada con los datos experimentales y la eficiencia con los datos numéricos obtenidos del programa, como se observa en la gráfica la eficiencia obtenida de los datos experimentales decae hasta establecerse en aproximadamente 0.55 (55%) de eficiencia, que es menor al calculado que 0.58(58%), pero se puede observar que la eficiencia calculada por el programa se acerca bastante en la eficiencia real.

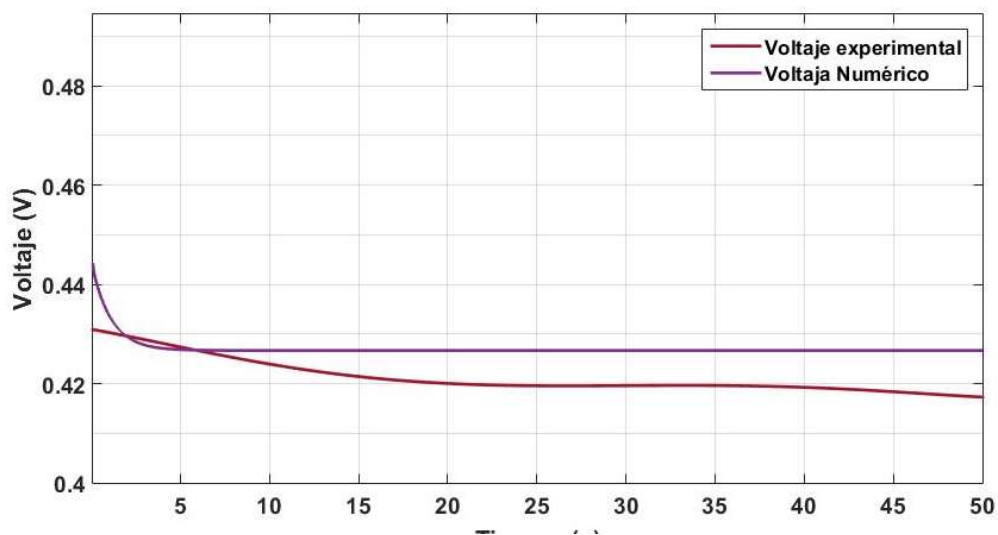


Figura 52. Comparación de voltaje de pila combustible con eficiencia, con una carga de 0.37 W.
Fuente: Autor.

En la figura 51 se tiene una comparación entre el voltaje de la pila combustible medido durante 10 segundos, en donde se puede ver la caída de voltaje con una carga de 0.37 W, el voltaje en el caso de los datos experimentales son alrededor de 0.43 V con ligeras variaciones, el voltaje de la curva de cálculo numérico se estabiliza en un voltaje de 0.44 V.

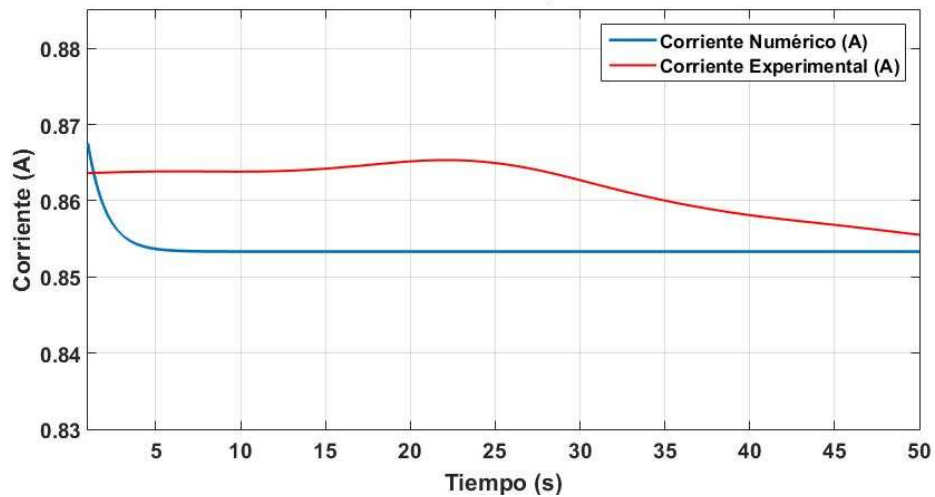


Figura 53. Comparación de corriente numérico y experimental con potencia de carga de 0.37 W
Fuente: Autor.

En la figura 52 se puede ver una comparación entre la curva de corriente con datos experimentales y numéricos, la corriente oscila entre 0.87 A, se puede ver que la curva de datos experimentales tiene una variación en los primeros segundos, pero en general las curvas son muy parecidas.

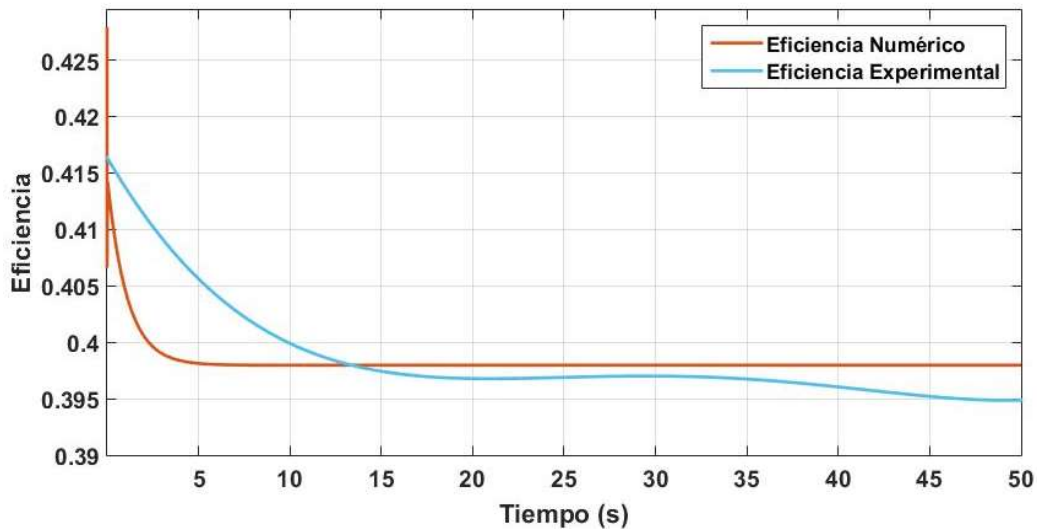


Figura 54. Comparación de eficiencia con datos experimentales y numérico con una carga de 0.37W.
Fuente: Autor.

En la figura 53 se puede observar que la eficiencia bajó hasta 0.4 (40%) con los datos de cálculo numérico, y con los datos de experiencia la eficiencia ha bajado hasta un y 39.5% de eficiencia.

4.4. Dispositivos utilizados para la medición de voltajes y corrientes de pila combustible.

Para realizar las mediciones de los voltajes y corrientes de la pila combustible que se encuentra en el CER, se utilizó shields de Arduino (Anexo 5) para recopilar los datos obtenidos y digitalizarlos, los datos obtenidos mediante serial.

En la tabla 10 están los datos de la pila combustible de una celda que sirve para realizar las simulaciones en el programa y así establecer condiciones iguales que permitan realizar una comparación y validación de los datos obtenidos. Las características fueron obtenidas del manual de J101 JUNIOR Basic. (Basic, s.f.)

Tabla 10. Datos de Pila combustible manual J101 JUNIOR Basic

Pila combustible		
Area Activa	4	cm^2
Potencia	500	mW
Voltaje general	0,40-0,96	v



Ilustración 7. Electrolizador Tipo PEME de una celda en el laboratorio CER
Fuente: Autor

El principio de funcionamiento de la pila combustible que se encuentra en Centro de Energías Renovables el cual se usó para validar datos es la siguiente, se utilizó una fuente externa para alimentar el electrolizador de una celada que en este caso fue una celda solar de 90 cm^2 , un voltaje 2 vDC y una corriente de 350 mA, la corriente pasa por el electrolizador descompone el agua en sus componentes base que son el hidrógeno y oxígeno, luego

estos dos elementos son almacenados en unos pequeños tanques de 30 cm^3 cada uno, a continuación el hidrógeno y oxígeno almacenados son enviados a la pila combustible donde ocurre la reacción química obteniendo una diferencia de potencial entre los bornes que va desde los 0.4V a 0.9V.

En la ilustración 7 se puede observar la reacción del electrolizador descomponiendo el agua en hidrógeno y oxígeno, la reacción de generación de hidrógeno es inmediato desde que se conecta a la alimentación, el hidrógeno es enviado a los tanques de almacenamiento y a su vez entregado a la pila combustible, la corriente mínima para una buena generación de hidrógeno es a 300 mA.

Código de Arduino para medición de los voltajes y corrientes.

En la ventana de programación (ilustración 8) de Arduino se programó y configuró los sensores de corriente y voltaje para la medición del sistema, los datos son recogidos y digitalizados, los datos fueron tomados cada segundo.

Se tomaron los datos recolectados y se guardaron en un archivo .xls con los que luego se obtuvo valores promedio para poder sacar curvas más fáciles de analizar, debido a que las mediciones hechas tenían ciertos valores que eran muy altas o muy bajas debido a errores de medición de los sensores.

```
mix_vol_cor Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
mix_vol_cor $
//programa de medición de voltajes y corrientes de pila combustible
//sensor de corriente
float Sensibilidad=0.185; //sensibilidad en Voltios/Amperio para sensor de 5A

// Sensor de voltaje
const int sensorPin = A0; // seleccionar la entrada para el sensor
int sensorValue; // variable que almacena el valor raw (0 a 1023)
float value; // variable que almacena el voltaje (0.0 a 25.0)

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

//*****
void loop() {
  sensorValue = analogRead(sensorPin); // realizar la lectura
  value = fmap(sensorValue, 0, 1023, 0.0, 25.0); // cambiar escala a 0.0 - 25.0
  //Serial.print("Volt: ");
  Serial.print(value ); // mostrar el valor por serial
  delay(1000);}

  //*****
  float I=get_corriente(200);//obtenemos la corriente promedio de 500 muestras
  Serial.print(" CorFC: ");
  Serial.println(I,3);
  delay(1000);
}

// cambio de escala entre floats
float fmap(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max)
{
  return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
}
< >
```

21 Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) en COM5

Ilustración 8. Ventana de programación de Arduino Mega
Fuente: Autor

CONCLUSIONES.

Un sistema basado en pila combustible y turbinas a viento puede ser usado en sitios aislados o áreas remotas que no cuenten con redes eléctricas y tengan una condición climática favorable (condiciones de viento adecuadas), además es amigable con el medio ambiente debido a que la generación por medio de este sistema no genera emisiones de CO₂ o cualquier gas causante de efecto invernadero; el programa puede predecir la reacción de la pila combustible tomando en cuenta la potencia de la carga y la potencia que puede ser entregada por la turbina a viento.

Los resultados obtenidos con las ecuaciones utilizadas para la conversión de energía del sistema de pila combustible en la simulación tienen un comportamiento bastante acercado a los resultados obtenidos mediante las mediciones realizadas de voltajes y corrientes en la pila combustible del CER.

Con los datos obtenidos de las mediciones y las observaciones durante los experimentos y posteriores cálculos se puede concluir que la eficiencia de la pila baja con potencias más altas, esto teniendo en cuenta que se mantiene una sola celda.

En base a las observaciones hechas durante las pruebas realizadas con el Junior Basic, se observó que el arranque puede ser lento si no se tiene hidrógeno almacenado previamente con lo cual la pila combustible irá elevando su voltaje y corriente hasta estabilizarse cuando la presión del hidrógeno y el oxígeno sean los adecuados.

La validación del modelo ha sido realizada con los datos obtenidos de la pila combustible del Centro de Energía Renovable (CER) demostrando que el modelo presentado es confiable y podemos utilizar como instrumento de diseño.

Las simulaciones realizadas con los datos de la pila combustible del Centro de Energías Renovables validan los datos de la simulación realizada para generar los 2000Wh en cogeneración con la central eólica.

Este sistema fácilmente puede abastecer y proveer 2000Wh durante un periodo de 3 horas consecutivas a una carga de 650W, asumiendo que esta carga en una vivienda es constante, pero se debe tener en cuenta que en la realidad en una casa los aparatos

eléctricos que consumen la energía suelen tener determinado tiempo de uso, por lo tanto, las 2000 Wh pueden ser distribuidos a lo largo de todo el día entre diferentes cargas.

RECOMENDACIONES.

Realizar estudios relacionados directamente con los electrolizadores en los que se puedan simular de manera más exacta el sistema de un electrolizador y validar datos de acumulación de masa de hidrógeno y energía necesaria para descomponer el agua en sus componentes base.

Cuando se trabaje con la pila combustible se debe tener cuidado de no introducir agua por las mangueras de esta, ya que la pila solo debe recibir el hidrógeno más puro posible y oxígeno, al tener agua en el conducto no ocurrirá la reacción química con normalidad por lo cual no habrá generación o por lo menos su eficiencia podría bajar mucho más.

En sistemas más grandes se debe tener cuidado al trabajar con elementos como el hidrógeno y el oxígeno debido a que estos son altamente inflamables y puede resultar catastrófico un accidente, por ello se deberían instalar sensores de gas que alerten de fugas en el sistema, ya que por ejemplo el hidrogeno es inodoro e incoloro, por lo cual no es fácil percibir a simple vista.

El mantenimiento en sistemas de generación con hidrógeno debe ser periódico con el fin de asegurarse el buen estado de tuberías y equipo en general y por ende afianzar la seguridad del personal que ahí labore.

Para posteriores trabajos se puede realizar cálculo de masa de agua en la pila combustible como resultado de la reacción química que se podrían validar mediante mediciones de cantidad de agua en el tanque del almacenamiento o mediante medidores de flujo.

NOMENCLATURA

HOBO: Software de medición meteorológica.

PEMFC: Electrolizador de Membrana de Intercambio protónico

PEME: Pila-combustible de Membrana de Intercambio protónico

GIC: Generación interna de calor

ETA: Energía Térmica Almacenada

PCA: Pérdidas de Calor en el Ambiente

CER: Centro de Investigación en Energías Renovables

n_{H_2} : Hidrógeno producido en moles por segundo (mol/s)

η_F : Eficiencia de Faraday (%)

i_e : Corriente del electrolizador (A)

F : Constante Faraday (C/Kmol)

T_a : es la temperatura ambiente (25°C)

M_{H_2} : Masa molar del hidrógeno (Kg/Kmol)

N_{H_2} : moles por segundo de hidrógeno entregado al tanque de almacenamiento (Kmol/s)

P_b : presión del tanque (Pa)

P_{bi} : Presión inicial del tanque de almacenamiento (Pa)

R : Constante universal del gas (Rydberg) (J/(Kmol °K))

T_b : Temperatura de operación del electrolizador (°K)

V_b : Volumen de tanque (m^3)

z : Factor de compresibilidad en función de la presión

C_t : Capacidad de calor de la pila combustible (10000 J/°C)

T es la temperatura de la pila combustible (K)

V_{ucap} : Voltaje de ultra-capacitor (V)

P_{H_2} : Presión del hidrógeno (atm)

P_{O_2} : Presión del oxígeno (atm)

CO_2 : Concentración de oxígeno

η_{act} : Potencial de activación de la pila combustible

R_{int} : Resistencia interna de la pila combustible

E : Potencial termodinámico Nernst (V)

v_{act} : Voltaje de activación de pila combustible (V)

Ra : Resistencia de activación (Ω)

\dot{m}_{H_2} : Caudal de hidrógeno (mol/s)

\dot{m}_{O_2} : Caudal de Oxígeno (mol/s)

ρ_{O_2} : Densidad del oxígeno

ρ_{H_2} : Densidad del hidrógeno

R : Constante universal del gas (atm/mol K)

V_{Fcell} : Voltaje de pila combustible

R_t : °C/W

V_a : Volumen de Ánodo de pila combustible (litros)

V_c : volumen de Cátodo de pila combustible (litros)

BIBLIOGRAFÍA

- (INER), I. N. (Marzo - 2013). *Proyecto Eólico San Cristobal Galápagos - Ecuador*.
- AIR403. (n.d.). *The New 400 Watt turbine*. Arizona, USA: Southwest Windpower, Inc.
- Amphlett, J. C., Baumert, R. M., Mann, R. F., Peppley, B. A., Roberge, P. R., & Harris, T. J. (n.d.). Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer electrolyte Fuel Cell. II. Empirical Model Development.
- Asencio, P. (n.d.). Energías Renovables para todos. Hidrógeno y pila combustible. In P. Asencio, *Energías Renovables para todos. Hidrógeno y pila combustible* (p. 18). Madrid: Sacal.
- Basic, J. (n.d.). *FuelCellStore*. Retrieved from <http://www.fuelcellstore.com/junior-basic-j101>
- Cavasassi, J. L. (n.d.). Como calcular la capacidad necesaria de batería para almacenar energía. Bolivia . Retrieved from cavadevices.com
- Coincil, G. W. (2017). *Global Wind Energy Coincil*. Retrieved from Global Wind Energy Coincil: <http://gwec.net/global-figures/graphs/>
- Ecured. (n.d.). *Ecured*. Retrieved from Ecured: https://www.ecured.cu/Charles_Francis_Brush
- ekidom. (n.d.). *ekidom*. Retrieved from ekidom: <http://www.ekidom.com/historia-de-la-energia-eolica>
- Esmaeili, S., & Shafiee, M. (2012, May 23). Simulation of Dynamic Response of Small Wind-Photovoltaic-Fuel Cell Hybrid Energy System.
- Feroldi, D., & Basualdo, M. (2012). Description of PEM Fuel Cells System.
- history, A. (n.d.). *American history*. Retrieved from <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/origins/orig1.htm>
- history, A. (n.d.). *American history*. Retrieved from <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/pem/pemmain.htm>
- Ibañez, P. (2012, Noviembre 21). *Motor Pasión*. Retrieved from Motor Pasión: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/vehiculos-electricos-de-pila-de-combustible-de-hidrogeno>
- Khan, M. J., & Iqbal, M. T. (2004, May 31). Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system. Canada.
- Khan, M., & Iqbal, M. T. (2004, May 31). Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system.

Khater, H., Abdelraouf, A., & Beshr, M. (2011, July 22). Optimum Alkaline Electrolyzer-Proton Exchange Membrane Fuel Cell Coupling in a Residential Solar Stand_Alone Power System.

Marin Calle, E. S. (2017). "Simulación dinámica de sistema híbrido (Pila combustible PEM y panel solar fotovoltaico) para una vivienda tipo de hasta 1200 Wh/día". Cuenca, Ecuador.

Martinez Reyes, R. (2016). Pilas de combustible tipo PEM. Aplicación al suministro de energía eléctrica a una vivienda. Sevilla.

MathWorks. (2015). *MATLAB&SIMULINK User's Guide*.

Maxwell.com. (n.d.). *Maxwell*. Retrieved from www.maxwell.com

Ogawa, T., Takeuchi, M., & Kajikawa, Y. (2018, February 11). Analisis of trends and Emerging Technologies in Water Electrolysis Research Based on a Computational Method: A Comparison with Fuel Cell Research.

Onar, O., Uzunoglu, M., & Alam, M. S. (2006, October). Dynamic modeling, design and simulation of a wind/ fuel cell/ ultra-capacitor- based hybrid power generation system.

Partesdel.com. (n.d.). *Partesdel.com*. Retrieved from Partesdel.com:
<https://www.partesdel.com/aerogenerador.html>

Renovable, M. d. (n.d.). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Retrieved from <https://www.energia.gob.ec/villonaco/>

Sami, S., & Garzon, J. P. (2017). "Thermal Analysis of Biomassa / Gas Turbine and Wind Turbine Hybrid Systems for Electricity Generation and District Heating". *International Journal of Current Research, Volume 9, Issue 4*.

Sami, S., & Marin, E. (05 May -2018). " Dynamic Modeling, and Simulation of Hybrid Solar Photovoltaic, and PEMFC Fuel Cell Power System". *RA JOURNAL OF APPLIED RESEARCH, ISSN: 2394-6709, DOI:10.31142/rajar/v4i5.02*, (pp. Volume: 04 Issue: Page no.- 1666-1683.).

San Martín , J. I., Zamora, I., Aperribay, V., & Eguia, P. (2009, Mayo 24-28). Décimo tercer encuentro Regional Ibero Americano de Cigré. *Análisis del comportamiento dinámico de una pila de combustible PEMFC*. Puerto Iguazú, Argentina.

teach, t. (n.d.). *tes teach*. Retrieved from <https://www.tes.com/lessons/BBxaBaiZx25Plg/hydrogen>

ANEXOS

Anexo 1. HOJA DE DATOS DE SISTEMA DE MEDICIÓN DE HOBO (DATASHEET)

21/11/2017

Weather Station Starter Kit: HOBO U30-NRC-SYS-B by Onset

ONSET

Status: Onset will be closing at 2pm on Wednesday, Nov. 22nd and remain closed on Nov. 23rd & 24th in observance of the Thanksgiving holiday. Orders and requests submitted after 1pm (ET) on Wednesday may not be processed or confirmed until Monday, Nov. 27th. We wish you a safe and happy holiday!



HOBOWEATHER U30 USB Weather Station Starter Kit

15 Channel Weather Station Part # U30-NRC-SYS-C

Price includes surcharge to cover US government-imposed duties on solar panels. Tripod Sold Separately.

Overview

The HOBOWEATHER Weather Station Starter Kit combines our most rugged data logging weather station with out-of-the-box convenience.

The U30/NRC accepts up to 10 plug-and-play Smart Sensors. Just plug in your sensor and it's automatically recognized – no programming, wiring or calibration necessary. With this kit you can measure temperature, relative humidity, wind speed/direction. Simply select the HOBOWEATHER Weather Station starter system and your choice of either a 2-Meter or 3-Meter Tripod Kit and go!

Software ordered separately. Compatible with HOBOWare and HOBOWare Pro software for logger setup, graphing and analysis.

Highlighted Features

- HOBOWEATHER U30 NRC data logger with 10 inputs (U30-NRC-000-10-S100-000)
- 3W Solar Panel - SOLAR-3W
- Temperature/RH Smart Sensor with 2-meter cable - S-THB-M002
- Wind Speed Smart Sensor with 3-meter cable - S-WSB-M003
- Wind Direction Smart Sensor with 3-meter cable - S-WDA-M003
- Full Crossarm for Wind Speed/Direction sensors - M-CAA
- Solar Radiation Shield for Temperature & RH sensor - RS3-B

In what environment does this kit operate?

This kit operates in an outdoor environment.

What measurements does this kit support?

The U30-NRC-SYS-C kit supports the following measurements: Barometric Pressure, Leaf Wetness, Light Intensity, Rainfall, Relative Humidity, Soil Moisture, Temperature and Wind

www.onsetcomp.com • 1-800-LOGGERS (564-4377)

<http://www.onsetcomp.com/products/kits/u30-nrc-sys-c#>

1/3

Detailed Specifications

HOBO U30 USB Weather Station Starter Kit

HOBO U30 NRC: see specifications

3W solar panel: see specifications

Temperature/RH Smart Sensor with 2-meter cable: see specifications

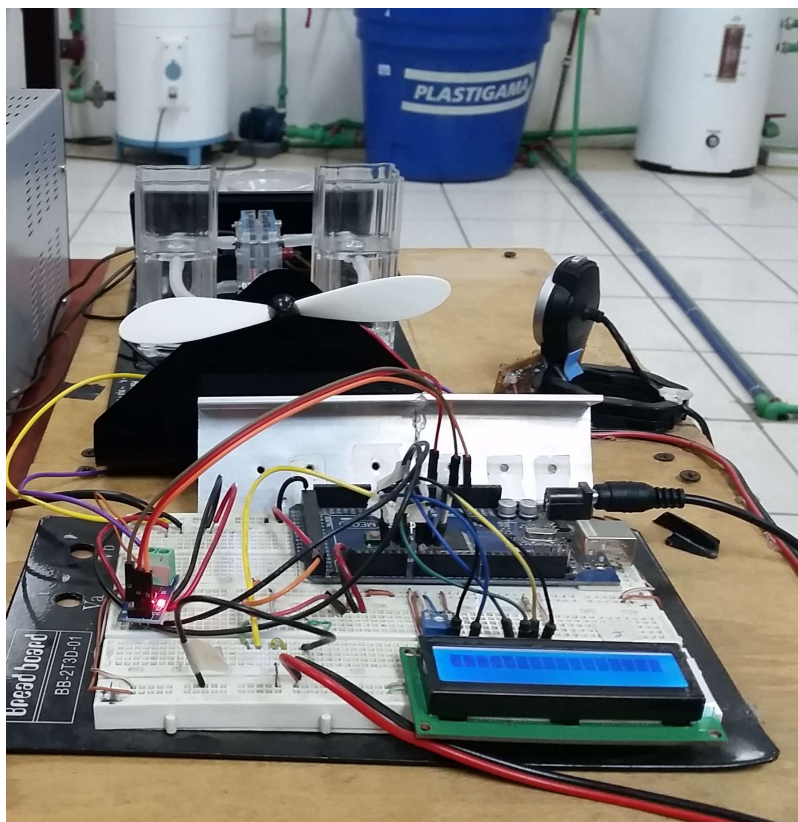
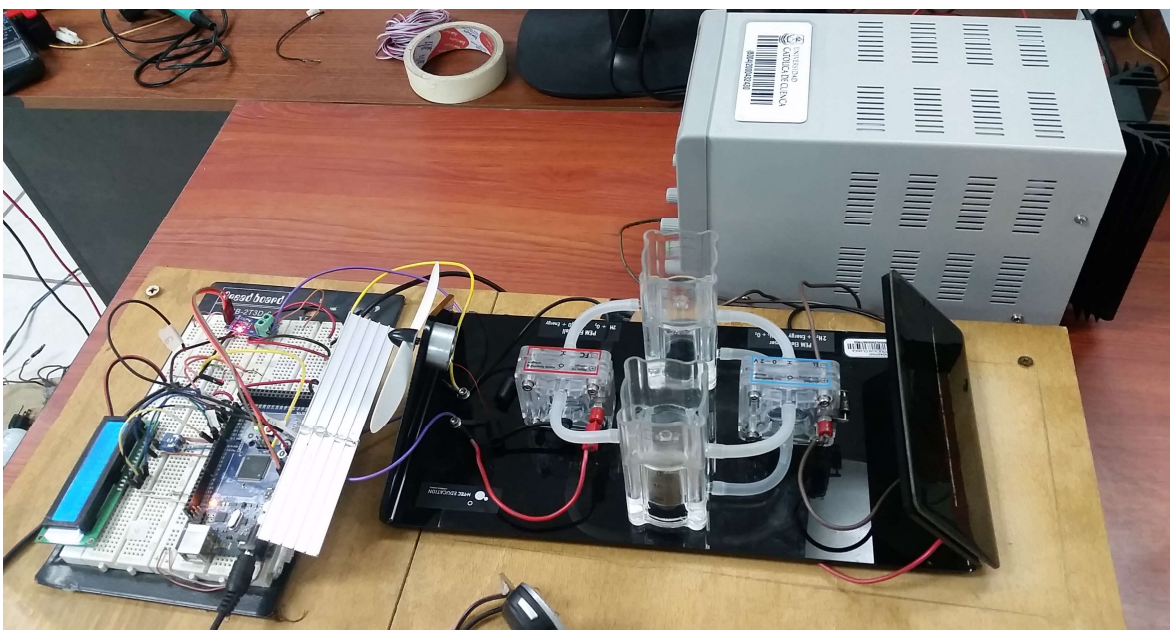
Wind Speed Smart Sensor with 3-meter cable: see specifications

Wind Direction Smart Sensor with 3-meter cable: see specifications

Full Cross-arm for wind speed/direction sensors: see specifications

Solar radiation shield for temperature & RH sensor: see specifications

Anexo 2. PILA COMBUSTIBLE JUNIOR BASIC J101 DEL CENTRO DE ENERGÍAS RENOVABLES CER



Anexo 3. HOJA DE DATOS TÉCNICOS Y MATERIALES DE LA PILA COMBUSTIBLE JUNIORBASIC (J101)

Material and Technical Data

JuniorBasic (J101)

Electrolyser:

Active area	4 cm ²
H ₂ -Production	5 cm ³ /min
O ₂ -Production	2.5 cm ³ /min
Power	1.16 W
Max. permissible voltage:	0-2 V=
Max. permissible current:	0-2 A=

Fuel cell:

Active area	4 cm ²
Power	500 mW
Generated voltage	0.40-0.96 V
	short circuit proof

Gas storage tank:

Volume	30 cm ³
--------	--------------------

Solar module:

Surface	90 cm ²
Open circuit voltage	2 V
Current	350 mA
Power (MPP)	500 mW

Fan:

Power	10 mW
-------	-------

H x W x D (JuniorBasic) 100 x 300 x 150 mm

Weight (JuniorBasic) 600 g

JuniorSet (J102)

1 x JuniorBasic	1 x Decade Resistor (2 mm ports)
2 x Digital Multimeter (2 mm ports)	3 x Cable (red)
3 x Cable (black)	1 x Stopwatch
1 x Distilled Water (250 ml)	

H x W x D (JuniorSet) 140 x 450 x 380 mm

Weight (JuniorSet) 2.8 kg

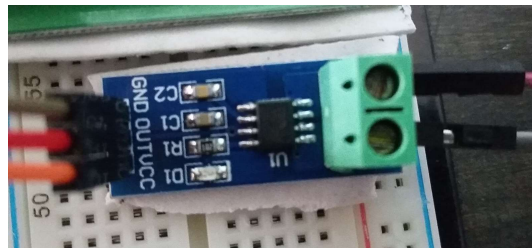
Anexo 4. TABLA DE CARGA ESTIMADA CON CONSUMO DE 2092WH, TIEMPO DE USO Y ENERGÍA UTILIZADA EN UN DÍA.

lista de aparatos en vivienda			
Artefacto	Potencia (W)	Tiempo de uso (h)	Energía (Wh)/día
Licudadora	600	0,1	60
Luces	150	4	600
Televisor	120	3	360
Laptop	196	2	392
Antena wifi	5	24	120
Radio grabadora	40	4	160
Cafetera	200	1,5	300
Aspiradora	100	1	100
Total			2092

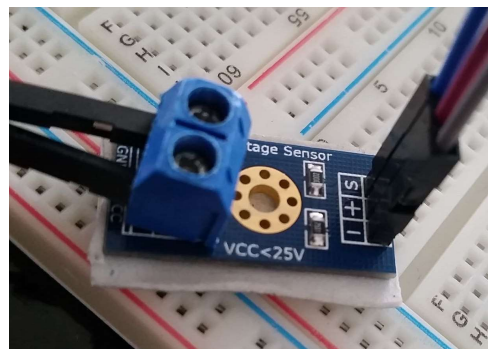
Anexo 5. DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA MEDICIÓN Y DIGITALIZACIÓN DE VOLTAJES Y CORRIENTES.



Módulo de programación Arduino At Mega 2560



Módulo Sensor de corriente DC Arduino



Módulo Sensor de Voltaje DC Arduino

