MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA GENERADOR DE ELECTRICIDAD, BASADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE HIDROGENO VERDE OBTENIDO MEDIANTE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autor
Luis Alberto Rodríguez Rodríguez

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Control y Automatización
Bogotá D.C. Abril, 2024

MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA GENERADOR DE ELECTRICIDAD, BASADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE HIDROGENO VERDE OBTENIDO MEDIANTE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autor
Luis Alberto Rodríguez Rodríguez, código 20201383003,
luialbrodriguezr@udistrital.edu.co

Modalidad
Monografía

Presentado para optar al título de: Ingeniero en Control y Automatización

Director:
Oscar Gabriel Espejo Mojica

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Control y Automatización
Bogotá D.C. Abril, 2024

Dedicatoria

A mi amada esposa Jennifer e hijas Kimberly y Sophia:

El pilar fundamental de mi vida, fuente inagotable de amor y apoyo incondicional. Gracias por su infinita paciencia, comprensión y aliento en cada paso de este arduo camino. Su presencia ha sido el faro que me ha guiado en los momentos más difíciles, llenando mi corazón de fortaleza e inspiración para seguir adelante. Este logro es tan suyo como mío, pues en cada página de esta tesis se refleja el amor y el sacrificio que han hecho por mí.

Al profesor Oscar Espejo:

Un mentor excepcional, cuya sabiduría y paciencia han sido invaluables en mi formación como investigador. Agradezco profundamente su guía experta, sus valiosos consejos y su genuina creencia en mis capacidades. Su dedicación y pasión por la enseñanza han dejado una huella imborrable en mi vida profesional.

Al ingeniero Antonio Viancha:

Expreso mi más sincero agradecimiento al ingeniero Viancha por su invaluable apoyo y asesoría técnica. Sus sabios consejos y su amplia experiencia me han permitido superar obstáculos y esclarecer dudas cruciales para el desarrollo de esta investigación. Su generosidad y disposición para compartir sus conocimientos han sido fundamentales en mi crecimiento como profesional.

Y por último, a mí mismo:

A ese ser que se atrevió a soñar, que perseveró con tenacidad y que nunca claudicó ante las adversidades. Reconozco el esfuerzo, la dedicación y las horas invertidas en este proyecto. Agradezco la fortaleza interior que me permitió superar cada obstáculo y la pasión que me impulsó a seguir adelante en busca de este objetivo.

Este logro es un reflejo de la unión de voluntades, del apoyo incondicional y de la fe inquebrantable en el poder de los sueños.

Con profunda gratitud,

Luis A. Rodríguez

Índice

Dedicatoria i
Índice de figuras. iii
Índice de Tablas vi
Glosario vi
Lista de Abreviaturas y Siglas viii
Resumen ix
Abstrac x
1. Introducción 1
2. Planteamiento del problema 1
3. Justificación 2
4. Objetivos 2
4.1. Objetivo General 2
4.2. Objetivos específicos 2
5. Marco de referencia 2
5.1. Antecedentes 2
5.2. Marco teórico 5
5.3. Marco Legal 13
6. Metodología 15
6.1. Necesidad del proyecto 16
6.2. Compras y Adquisiciones 17
6.3. Diseños y planos 17
6.3.1. Parte electrónica 18
6.3.2. Parte neumática 27
6.4. Montaje 31
6.4.1. Montaje en PCB 31
6.4.2. Conexiones y montaje en gabinete 34
6.5. Pruebas 36
6.5.1. Pruebas panel solar Circuito abierto 36
6.5.2. Pruebas con Celda HHO 40
6.5.3. Pruebas con celda HH-OO 48
6.5.4. Pruebas Celda de combustible 56
7. Resultados 61
8. Conclusiones y Recomendaciones 71
9. Referencias 72

Índice de figuras.

Figura 1. Descripición efecto fotovoltaico. (Cumbres Pueblos, 2019). 6
Figura 2. Descripción efecto fotovoltaico. (Perpiñan, 2013) 7
Figura 3. partes de un panal solar. (Vivienda la revista de la construcción, 2019) 8
Figura 4. Sistema fotovoltaico Autónomo. (Méndez & Cuervo, 2011) 9
Figura 5. Sistema fotovoltaico Conectado a la red.. (Méndez & Cuervo, 2011) 9
Figura 6. Sistema fotovoltaico Conectado a la red. (Romero, 2018) 11
Figura 7. Partes de una celda de combustible. (Revistahypatia) 12
Figura 8. Diagrama de solución inicial. Fuente propia. 16
Figura 9. Admisión de fuente y carga de batería. Fuente propia. 18
Figura 10. Batería 14.8 V. Fuente propia 19
Figura 11. Circuito de 10 VDC. Fuente propia. 19
Figura 12. Circuito de 5 VDC. Fuente propia. 20
Figura 13. NodeMCU ESP8266. (Last Minute Engineers , s.f.) 21
Figura 14. Modulo Sensor INA 3221 (Zamper Store, s.f.) 22
Figura 15. Modulo Sensor INA 219 (AdaFruit , s.f.) 22
Figura 16. Modulo ADC ADS1115. (Electronilab, s.f.) 23
Figura 17. Display OLED (Ebay, s.f.) 23
Figura 18. Modulo RTC-Datalogger . (Aliexpress, s.f.) 24
Figura 19. Sensor de flujo volumétrico (Winsen, 2020) 24
Figura 20. Regulador MPPT 5ª (Amazon, s.f.) 25
Figura 21. Dimensiones panel solar (Sunera) 26
Figura 22. Circuito de acoples MCU con sensores. Fuente propia. 27
Figura 23.Acondicionamiento de sensores. Fuente propia. 27
Figura 24. Celda de HHO. Fuente propia. 28
Figura 25. Sistema celda de HHO. Fuente propia. 28
Figura 26. Celda separadora de gases. Fuente propia. 29
Figura 27. Diagrama P&ID de las celdas. Fuente propia. 29
Figura 28. Celda de combustible. Fuente propia. 30
Figura 29. Diagrama Celda de combustible. Fuente propia. 30
Figura 30. Diseño de PCB plano de pistas. Fuente propia. 31
Figura 31. PCB sin componentes. Fuente propia. 32
Figura 32. Lado posterior de la PCB con componentes. Fuente propia. 33
Figura 33. Lado frontal de la PCB con componentes. Fuente propia. 33
Figura 34. Ensambles de circuito y gabinete. Fuente propia. 34
Figura 35. Montaje completo, parte interna del gabinete. Fuente propia. 35
Figura 36. Montaje completo, parte externa del gabinete. Fuente propia. 35
Figura 37. Montaje completo, parte externa superior del gabinete. Fuente propia 36
Figura 38. Montaje Panel solar circuito abierto. Fuente propia 37

Figura 39. Pruebas iniciales con panel solar en protobard. Fuente propia 37
Figura 40. Montajes iniciales con pruebas en circuito abierto. Fuente propia 37
Figura 41. Voltaje del panel en amanecer. Fuente propia..... 38
Figura 42. Voltaje del panel en el día. Fuente propia 38
Figura 43. Voltaje del Panel Atardecer. Fuente propia..... 39
Figura 44. Pruebas iniciales del panel con PCB. Fuente propia 39
Figura 45. Grafica promedio de los datos recaudado. Fuente propia 40
Figura 46. Montaje celdas en funcionamiento. Fuente Propia..... 41
Figura 47. Flujo de gas a 5% de electrolito. Fuente propia 41
Figura 48. Corriente en Celda HHO a 5% de electrolito. Fuente propia 42
Figura 49. Voltaje en Celda HHO a 5% de electrolito. Fuente propia 42
Figura 50. Flujo de gas a 10% de electrolito. Fuente propia. 44
Figura 51. Flujo de gas a 15% de electrolito. Fuente propia. 45
Figura 52. Flujo de gas a 20% de electrolito. Fuente propia 47
Figura 53. Comportamiento del voltaje, Celda separadora a 10% del electrolito. Fuente propia. 49
Figura 54. Comportamiento de voltaje, celda separadora desde Thingspeak. Fuente propia..... 49
Figura 55. Flujo de hidrogeno celda separadora al 10% de electrolito. Fuente propia..... 50
Figura 56. Flujo de Oxígeno en la celda separadora a 10% de electrolito..... 50
Figura 57. Flujo de Hidrogeno (naranja) contra flujo de oxígeno (azul). Fuente propia..... 50
Figura 58. Flujo de Hidrogeno en la celda separadora a 15% de electrolito. Fuente propia. 52
Figura 59. Flujo de Oxígeno en la celda separadora a 15% de electrolito. Fuente propia. 52
Figura 60. Flujo de Hidrogeno (azul) contra flujo de oxígeno (naranja). Fuente propia..... 53
Figura 61. Flujo de Hidrogeno en la celda separadora a 20% de electrolito. Fuente propia. 54
Figura 62. Flujo de Oxigeno en la celda separadora a 20% de electrolito. Fuente propia. 55
Figura 63. Flujo de Hidrogeno (Naranja) contra flujo de oxígeno (azul). Fuente propia..... 55
Figura 64. Voltaje y corriente Celda de combustible. al 15% de electrolito en la celda HHOO Fuente Propia 57
Figura 65. Voltaje Celda separadora con electrolito 15%. Fuente propia 58
Figura 66. Flujo de Oxigeno (izquierda) e Hidrogeno (derecha) al 20% de electrolito en la celda HHOO. Fuente propia. 58
Figura 67. Voltaje y corriente Celda de combustible. al 20% de electrolito en la celda HHOO Fuente Propia. 59
Figura 68. Flujo de hidrogeno en la Celda de combustible. al 20% de electrolito en la celda HHOO Fuente Propia. 59
Figura 69. Flujo de Oxígeno al 20% de electrolito en la celda HHOO. Fuente Propia. 60
Figura 70. Montaje Final Sistema de generación de voltaje a través de hidrogeno verde. Fuente propia. 61
Figura 71. Panel solar sobre el medio día. Fuente propia. 62
Figura 72.Comportamiento panel solar entes de activar la celda separadora. Fuente propia. 62
Figura 73. Comportamiento panel solar activando celda separadora de gases cuando radiación solar es insuficiente. Fuente propia. 63

Figura 74. Comportamiento de voltaje en panel solar contra la celda separadora. Fuente Propia. 63
Figura 75. Flujo de hidrogeno generado con alimentación de panel solar. Fuente propia. 64
Figura 76. Tanques indicadores de flujo gaseoso sin actividad. Fuente propia..... 64
Figura 77. Voltaje de panel solar contra celda generadora a lo largo de 4 horas. Fuente propia. 65
Figura 78. Voltajes y corrientes generados por la celda de combustible. Fuente propia..... 67

Índice de Tablas

Tabla 1. Componentes para ensamblar el diseño de PCB. Fuente propia. 33
Tabla 2. Datos de las variables de la celda HHO al 5% de concentración de NaOH. 43
Tabla 3. Datos de las variables de la celda HHO al 10% de concentración de NaOH. Fuente propia. 45
Tabla 4. Datos de los sensores de la celda HHO al 15% de concentración de NaOH. Fuente propia. 46
Tabla 5. Datos de los sensores de la celda HHO al 20%. Fuente propia. 48
Tabla 6. Datos de los sensores de la celda HHOO al 10%. Fuente propia. 51
Tabla 7. Datos de los sensores de la celda HHOO al 10%. Fuente propia. 54
Tabla 8. Datos de los sensores de la celda HHOO al 20%. Fuente propia 56
Tabla 9. Datos de los sensores de la celda HHOO al 15%. Fuente propia. 57
Tabla 10. Datos de los sensores de la celda HHOO al 20%. Fuente propia. 60
Tabla 11. Datos prueba con panel solar. Fuente propia. 67
Tabla 12. Datos prueba celda de combustible. Fuente propia. 69

Glosario

Hidrógeno verde	El hidrógeno verde es producido a partir de la electrólisis del agua utilizando electricidad de energías renovables, lo que lo convierte en una fuente de energía limpia y sostenible.
Electrólisis	La electrólisis es el proceso mediante el cual se el agua se descompone molecularmente en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de una corriente eléctrica.
Energía renovable	La energía renovable es aquella que se obtiene de fuentes naturales que se regeneran continuamente, como la energía solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y biomasa.
Energía verde	La energía verde se refiere a la energía producida a partir de fuentes renovables y limpias, como la solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica.
Electrólisis de alta temperatura	La electrólisis de alta temperatura utiliza temperaturas superiores a los 800°C para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno. Este proceso se considera más eficiente que la electrólisis convencional.

Pilas de combustible de hidrógeno	Las pilas de combustible de hidrógeno convierten el hidrógeno en electricidad y agua, generando energía limpia y eficiente.
Almacenamiento de hidrógeno	El almacenamiento de hidrógeno es la capacidad de retener el hidrógeno generado para su uso posterior. Las tecnologías de almacenamiento incluyen tanques de almacenamiento, hidruros metálicos y sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido.
Economía del hidrógeno	La economía del hidrógeno es un sistema energético basado en la producción, almacenamiento y uso del hidrógeno como fuente de energía limpia y sostenible.
Celdas de combustible de óxido sólido	Las celdas de combustible de óxido sólido son dispositivos que generan electricidad a partir del hidrógeno y el oxígeno a través de reacciones químicas en un medio de óxido sólido.
Hidrógeno azul	El hidrógeno azul se produce a partir del gas natural y se captura el dióxido de carbono (CO2) resultante del proceso. Esto lo convierte en una alternativa más limpia y sostenible que el hidrógeno gris

Lista de Abreviaturas y Siglas

Sigla/Abreviatura	Significado
SFA	Sistema Fotovoltaico Autónomo
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red
DC	Corriente directa
AC	Corriente Alterna
HHO	Gas oxihidrógeno
DAQ	Tarjeta de adquisición de datos
RTC	Reloj en tiempo real
GPIO	Entrada y salidas de propósitos general
ADC	Conversor análogo digital
SPI	Interfaz de periféricos en serie
I2C	Circuto inter-integrado
IOT	Internet de las Cosas
MCU	Microcontrolador
SCCM	Centímetros cúbicos estándar por minuto

Resumen

El consumo excesivo de combustibles fósiles y sus derivados junto con la extracción de los mismos en el planeta a lo largo de los últimos 100 años ha causado graves problemas que a la fecha ya son irreversibles en materia de medio ambiente, esto implica que tenemos los días contados. Por eso es necesario realizar una transición energética donde sea posible abandonar o reducir la dependencia de estos combustibles y de otras fuentes generadoras de energía que afectan gravemente al medio ambiente.
Teniendo en cuenta lo anterior se agudiza cada vez más el estudio de nuevas alternativas para generación de energías limpias desde distintos puntos de vista, por ello surgen energías como la mareo motriz, la eólica y la solar fotovoltaica que son las principales fuentes de energía renovable pero al mismo tiempo se estudian otras formas de generar energía limpia, es ahí donde el mundo estudia la generación de hidrogeno verde como fuente de energía y de combustible para reemplazar las fuentes actuales.
La investigación del campo de las energías renovables tanto en el país como en la universidad distrital Francisco José de Caldas sede tecnológica avanza a grandes pasos es por eso que este proyecto pretende realizar el montaje de un sistema para medir la eficiencia energética en potencia generada por una celda de combustible la cual es alimentada por hidrogeno verde obtenido a través de una celda de HHO y otra de HH-OO, estas celdas funcionan con energía solar por lo cual se tendrá como referencia la potencia generada del panel contra la potencia que genera la celda de combustible después del proceso realizado.
Para ello el sistema cuenta con una tarjeta de adquisición de datos la cual está en la capacidad de tomar las medidas a través de sensores de voltaje, corriente para revisar la producción de potencia que entrega el panel y la que genera la celda de combustible, flujo volumétrico para revisar la producción de hidrogeno hecha por las celdas de HHO Y HH-OO y así poder tener una relación entre producción de hidrogeno contra potencia generada. Todo este sistema cuenta con una visualización en una pantalla oled al tiempo que se estará monitoreando la mayoría de las variables a través de la plataforma IOT de Matlab ThinkSpeak, la cual nos permite tener visualizaciones en tiempo real al tiempo que nos recolecta los datos para los análisis posteriores.

La investigación realizada en esta tesis demostró la viabilidad de generar voltaje DC a partir de hidrógeno verde producido por un panel solar. La eficiencia del sistema, aunque no es óptima, abre la puerta a la implementación de esta tecnología en aplicaciones de energía renovable. Se recomienda continuar investigando en la optimización del sistema para mejorar la eficiencia y explorar la aplicación de esta tecnología en diferentes escenarios.

Palabras clave: Hidrogeno verde, Celdas de combustible, Conversión Energética, Eficiencia Energética, Medición Energética, Sistemas de almacenamiento de energía, sistemas fotovoltaicos.

Abstract

The excessive consumption of fossil fuels and their derivatives, along with their extraction on the planet over the past 100 years, has caused serious problems that are already irreversible in terms of the environment, which implies that we have our days numbered. That is why it is necessary to carry out an energy transition where it is possible to abandon or reduce dependence on these fuels and other energy sources that seriously affect the environment.

Taking the above into account, the study of new alternatives for the generation of clean energy from different points of view is becoming increasingly urgent, which is why energies such as tidal energy, wind energy and solar photovoltaic energy emerge as the main sources of renewable energy. At the same time, other forms of generating clean energy are being studied, which is where the world is studying the generation of green hydrogen as a source of energy and fuel to replace current sources.

Research in the field of renewable energy, both in the country and at the Francisco José de Caldas District University, Technological Campus, is advancing rapidly, which is why this project aims to assemble a system to measure the energy efficiency in power generated by a fuel cell which is powered by green hydrogen obtained through an HHO cell and another HH-OO cell. These cells operate with solar energy, so the power generated by the panel will be used as a reference against the power generated by the fuel cell after the process is carried out.

To this end, the system has a data acquisition card that is capable of taking measurements through voltage and current sensors to check the power production delivered by the panel and that 44111generated by the fuel cell, volumetric flow to check the production of hydrogen made by the HHO and HH-OO cells and thus be able to have a relationship between hydrogen production against power generated. This entire system has a visualization on an OLED screen while most of the variables will be monitored through the Matlab ThinkSpeak IOT platform, which allows us to have real-time visualizations while collecting data for later analysis.

The research carried out in this thesis demonstrated the feasibility of generating DC voltage from green hydrogen produced by a solar panel. The efficiency of the system, although not optimal, opens the door to the implementation of this technology in renewable energy applications. It is recommended to continue researching the optimization of the system to improve efficiency and explore the application of this technology in different scenarios.

Keywords: Fuel cells, Energy conversión, Energy efficiency, Energy measurement, Energy storage systems, Photovoltaic systems.

1. Introducción

En la actualidad, la búsqueda de fuentes de energía renovable se ha convertido en una prioridad global para mitigar los efectos del cambio climático ya que la forma exponencial en que la humanidad ha ido reduciendo sus recursos energéticos alarma a todos porque eso nos puede llevar a una crisis energética. Bajo esa premisa este trabajo pretende revisar lo prometedoras que pueden ser para la generación de energías limpias las celdas de combustible que funcionan a través de hidrogeno verde. Los paneles solares aprovechan la radiación solar a través del efecto fotovoltaico para generar un voltaje DC, mientras que las celdas de combustible utilizan reacciones químicas, como la del hidrógeno y el oxígeno, a través del proceso de electrolisis inversa para generar electricidad.

El objetivo de esta tesis es analizar y comparar la potencia entregada por los paneles solares y las celdas de combustible, evaluando su eficiencia, rendimiento y viabilidad como fuentes de energía renovable ya que se tiene certeza que ambas tecnologías son un poco costosas, pero para ello, se llevará a cabo un exhaustivo estudio experimental que incluirá mediciones de potencia en diferentes condiciones y análisis de los factores que influyen en el desempeño de ambas tecnologías.

A medida que avance este proyecto, se considerarán variables como la ubicación geográfica, las variaciones climáticas y tiempos de producción energética. Al finalizar este estudio, se espera obtener conclusiones sólidas que ayuden a comprender mejor las fortalezas y limitaciones de cada tecnología, proporcionando así una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la energía renovable tanto en la universidad como en el país.

2. Planteamiento del problema

La actual, crisis climática provocada por el uso excesivo de combustibles fósiles a lo largo de varios años, está provocando una revolución energética en la cual se está iniciando una transición donde se pretende ir dejando de lado los combustibles fósiles mientras se buscan soluciones más amigables para el medio ambiente en cuanto al tema de generación energética. Por tal motivo se desarrollan sistemas de energía limpia que no afectan a gran escala el medio ambiente, tales energías como la solar fotovoltaica, eólica, mareo motriz y hasta la nuclear que se considera una energía limpia bajo estrictas condiciones de funcionamiento, han ayudado a la humanidad para poder realizar dicha transición. Actualmente en materia de investigación se plantea darle un uso al hidrogeno verde generado a través de sistemas de generación ya sea eólica o solar ya que muchas veces hay recursos que estos generan y que no pueden ser aprovechados por tal motivo transformar dicha energía en hidrogeno mediante hidrolisis para luego ser almacenado en celdas de combustible o empleado directamente como combustible es una gran solución al problema energético que se está empezando a vivir actualmente.

3. Justificación

Con el fin de dar una solución y aprovechando el potencial energético que Colombia tiene debido a su ubicación geográfica en la línea del ecuador y sobre todo sus diferentes relieves geográficos, lo cual da como resultado una gran variedad de climas. Se pretende realizar un prototipo que permita obtener hidrogeno a través de la generación de electricidad usando el efecto fotovoltaico. Esta solución pretende abarcar dos cosas importantes: ver el hidrogeno como fuente energética para la generación de voltaje mediante hidrolisis inversa y al mismo tiempo observar cómo se puede almacenar dicho hidrógeno para ser aprovechado en su forma natural. Por lo cual el estudio que se realizará podrá ayudar en gran medida para que otras personas interesadas en este campo complementen sus ideas.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Medir la eficiencia Energética en un generador de voltaje a partir de hidrogeno verde obtenido con un sistema fotovoltaico.

4.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un prototipo de generador, por medio de hidrólisis inversa usando parámetros de consumo fijos.
- Desarrollar un sistema de monitoreo de potencia usando un microcontrolador y sensores de voltaje y corriente DC que permita medir las variables del proceso.
- Captar los datos de las variables de proceso en la plataforma ThingSpeak la cual permitirá obtener un data set de las medidas realizadas por los sensores instalados.
- Realizar un análisis de los datos obtenidos en el monitoreo que permita medir la eficiencia del sistema fotovoltaico versus la producción de voltaje del sistema de hidrogeno verde.

5. Marco de referencia

5.1. Antecedentes

5.1.1. **Diseño e implementación de una celda generadora de hidrógeno en un motor de combustión interna en la ciudad de Bogotá.**

En esta tesis se plantea el diseño e implementación de una celda de combustible que genera gas Hidroxi (**HHO**), compuesto por dos átomos de Hidrógeno y uno de oxígeno. “Este gas se produce

a partir de la electrolisis de agua (**H2O**) y un electrolito en este caso **KOH"**. Para este proyecto se aprovecha la batería que trae el automotor y así poder generar hidrogeno como combustible en un motor de combustión de cuatro tiempos de un auto dando como resultado la generación de energía limpia para poder impulsar el automotor. Se realizó la comparación del desempeño del motor con gasolina e hidrógeno donde se pudo observar la gran diferencia en el desempeño del motor. (Jimenez & Marin, Diseño e implemetación de una celda generadora de hidrogeno en un motor de combustión interna en la ciudad de Bogotá., 2021)

5.1.2. **Evaluación de alternativas para potencializar el uso de hidrógeno como vector energético.**

En esta tesis de maestría se plantea el uso de hidrogeno como fuente de energía suplementaria de un sistema eólico, en el cual cuando se genere un exceso en la producción de energía eléctrica y poca demanda de carga, se tomará dicha energía sobrante del generador eólico y será trasmitida a un sistema generador de hidrogeno el cual usa hidrolisis como proceso fundamental para la separación de las moléculas del agua. Una vez se genera el hidrogeno este pasa a ser almacenado en tanques a presión para luego en el caso de que se requiera o exista un déficit de energía por exceso de cargas pueda entrar a operar la celda de combustible a suplir la falta de energía eléctrica y así poder cumplir con la demanda energética. Finalmente, los autores concluyeron que la generación de energía eléctrica a partir de una celda de combustible de hidrogeno superó las expectativas esperadas. (Aguilar, 2017)

5.1.3. **Electrical generator device including a fuel cell.**

En esta patente se habla sobre la creación de una celda de combustible que está interconectada a la salida de un generador de hidrogeno en el cual se menciona que podría ser un calentador químico o un amplificador de ácido nucleico el cual generan hidrogeno como subproducto de su proceso y este es dirigido a la pila de combustible, también contemplaron que a la salida de dicho generador exista una membrana hidrofóbica para permitir únicamente la salida de hidrogeno a la pila de combustible para así evitar que se filtren líquidos al tanque depósito de hidrogeno.
Las pilas de combustible que se mencionan son generalmente las que están compuestas por una parte un electrolito estático que se encuentra en un depósito entre dos electrodos, en los cuales el ánodo se alimenta de un contendedor de hidrogeno y el cátodo de uno de oxígeno, más a fondo podemos observar que el electrolito se encuentra en un canal de circulación en el cual se encuentran conectados tanto el ánodo como el cátodo. Dicho canal está compuesto por un material de tipo poroso a base de papel donde el flujo del electrolito se hace por capilaridad. (Ezquivel et al. 2016)

5.1.4. **Fuel cells with lifting converters for alternative energies.**

En este artículo de la revista SciELO Cuba se plantea el uso de convertidores DC-DC tipo BOST (elevadores), para aumentar el voltaje de salida de una celda de combustible tipo PEM que se alimenta de hidrogeno, adicionalmente dicho sistema será monitoreado por un controlador tipo PI el cual ayudará a mantener estable este voltaje de salida del BOST. Estos elementos se convierten en un sistema controlado en el cual se busca que a su salida garanticen 48 V DC y así poder utilizar este voltaje en generación de energía AC. Ya que muchos de los sistemas empleados en la generación de energía eléctrica AC que utilizan las energías alternativas como base para poder realizar dicha conversión trabajan con 12v, 24v, 48v. Por tal motivo al garantizar un voltaje estándar de salida los controladores y conversores podrán trabajar con mejor eficiencia. (Lopez et al, 2018)

5.1.5. **Análisis de la conveniencia de la implementación de celdas de combustible PEM a base de hidrógeno en el sistema de iluminación en el edificio transcoop.**

La presente monografía nos presenta el estudio y análisis que se llevó a cabo en una instalación de tipo empresarial en la cual su consumo de energía eléctrica estaba bastante elevado y se optó por implementar un sistema de energías alternativas al de la red que ofrece ENEL. Para este caso el autor utilizó una celda de combustible tipo PEM (membrana de intercambio de protones) la cual funciona a base de Hidrogeno donde este actúa como combustible en un proceso electro-quimico y el oxígeno como elemento oxidante el cual es obtenido a través del aire, esta celda ayudaba a suplir la necesidad energética que tenía dicho lugar. Adicionalmente se hizo el estudio de costos y todo lo relacionado con vialidad y beneficios que ofrece el estado colombiano en el área de implementación de energías alternativas como lo es la ley 1715 del 2014 la cual genera incentivos para que se lleven a cabo proyectos de este tipo. (Montaña, 2018)

5.1.6. **Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis.**

El proyecto de grado planteado por los señores Velásquez y Quinceno basado en la problemática que existe para encontrar otras fuentes de energías renovables y que hagan menos daño al medio ambiente a diferencia del petróleo y todos sus derivados.
La generación de hidrogeno a través de diferentes medios como lo son electrolisis, descomposición de gas natural por medio de arco de plasma, termólisis, termo catálisis entre otros; está cada vez en demanda y por lo tanto se busca optimizar los procesos para la obtención de este valioso gas que es difícil de encontrar en su estado natural por tal motivo en este proyecto de grado los autores después de estudiar las diferentes técnicas para la obtención de hidrogeno se inclinaron por usar la electrolisis donde después de indagar bastante y una vez obtenido dicho material su nuevo problema es como almacenarlo por lo cual utilizan un tanque diseñado por ellos mismos junto a una celda de combustible la cual transformará dicho hidrogeno en electricidad. Cabe destacar que para este proyecto no se utilizaron fuentes de energía alternativas para realizar la electrolisis. (Velasquez & Quiceno, 2013)

5.1.7. **Estimación del potencial de producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica en ecuador.**

En el Anterior artículo los autores plantean como Ecuador puede ser potencia energética con la generación de hidrogeno verde a través de sistemas fotovoltaicos los cuales impulsaran la producción de hidrogeno mediante sistemas de electrolisis PEM. El planteamiento principal se basa en la estimación de horas sol que recibe cada provincia en el país, con lo cual se calculan la radiación que reciben y con estos datos teóricos estiman el tamaño de cada sistema y su generación tanto de energía eléctrica a través de los sistemas fotovoltaicos como de hidrogeno a través de la electrolisis. Cabe resaltar que este articulo sus datos son todos teóricos en el cual se plantea como pueden aprovechar las fuentes renovables de energía en el país, lo cual si se llegara a aplicar sería bastante benéfico para el país ya que sus estudios estiman que se dejaría la dependencia de combustibles fósiles, ya que el hidrógeno pasaría ser una nueva fuente de energía y reduciría el consumo de gasolina en un 50% y el diésel en un 70% o más, sin mencionar que se reduciría en gran medida los gases de efecto invernadero. (Posso et al, 2016)

5.1.8. **Wind power for hydrogen production using a spiral electrolyzer.**

Este artículo basado en una investigación de la universidad de Cartagena en conjunto con la universidad de Alberta nos explica cómo se diseñó un prototipo de generador eléctrico el cual usaba como fuente de energía principal la energía eólica en su primera etapa, luego se aprovechaba la energía generada por dicho generador para alimentar un sistema de electrolisis el cual sirve como generador hidrogeno. Este gas es almacenando en celdas de combustible para luego ser aprovechado en diferentes áreas. El estudio habla del impacto positivo que se tiene al usar fuentes de energías renovables para la generación de hidrogeno como combustible o como fuente de energía eléctrica, ya que su generación es amigable con el medio ambiente y se reducen en un alto rango las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente y como esto puede ayudar a futuro ya que se está pasando por una transición energética donde hay que dejar de depender de los combustibles fósiles para poder subsanar el medio ambiente que decae a causa de ello. (Jimenez et al, 2015)

5.2. Marco teórico

A lo largo de la historia el hombre ha dependido de diferentes fuentes de energía para poder llevar a cabo su día a día, desde sus inicios con el fuego hasta la actualidad donde a medida que las civilizaciones avanzaban así mismo lo hacia la demanda energética. Se sabe que el hombre ha usado combustibles fósiles y sus derivados como fuentes de energía para motores de combustión, generación de energía eléctrica entre otros. Pero los recursos en el planeta son finitos, cada día las minas de carbón se quedan sin recursos, se vacían los pozos petroleros, las represas que se construyen para las hidroeléctricas a pesar de tener beneficio energético genera bastantes

problemas en la población y medio ambiente donde son construidas. Vemos como poco a poco esta explotación va dañando el planeta sin poder detenerlo.
Afortunadamente la humanidad no solo avanza en la extracción de minerales y consumo de combustibles fósiles, también se preocupa para hallar diferentes formas de generar energía con menos impacto ecológico negativo. Las energías renovables y su transición ya son una realidad donde su implementación ayuda a gran medida a mitigar el daño colateral que ha recibido el planeta a lo largo de la historia.
Algunas de las energías renovables no convencionales que se usan actualmente son la eólica, solar fotovoltaica, mareomotriz, energía hidroeléctricas, biomasas entre otros. Es proyecto estará enfocado en la energía solar fotovoltaica y en la generación de energías limpias a través del hidrogeno verde.

5.2.1. **Energía solar fotovoltaica**

Se entiende por energía solar fotovoltaica al fenómeno en el cual se obtiene electricidad por medio de la radiación solar. Esto sucede gracias al efecto fotovoltaico el cual es un efecto fotoeléctrico caracterizado generalmente por la producción de corriente eléctrica entre dos tipos de material diferente que están en contacto y expuestas a la radicación solar. El efecto fotovoltaico comienza cuando un fotón impacta con un electrón en la última órbita de un átomo de silicio. Éste último electrón es llamado el electrón de valencia y recibe la energía de impacto con la que viaja el fotón. Dicho fotón es una partícula portadora de varias las formas de radiación electromagnética entre ellas están incluida la radiación solar. “Si la energía adquirida por el electrón supera la fuerza de atracción del núcleo del átomo del silicio (energía de valencia), este sale de su órbita y queda libre. Al quedar libre, el electrón puede viajar a través del material conductor formando una corriente continua”. (Cumbres Pueblos, 2019).

+.

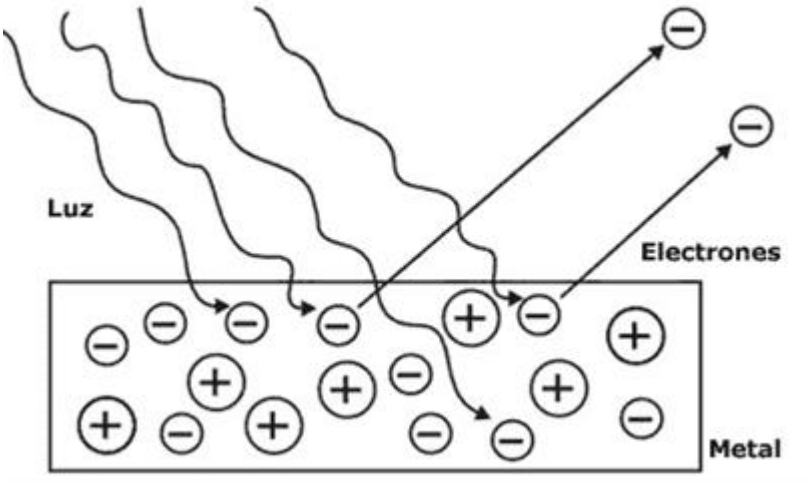


Figura 1. Descripción efecto fotovoltaico. (Cumbres Pueblos, 2019).

1.1.1. **Células solares y paneles**

Una celda fotovoltaica es un dispositivo compuesto por una lámina de material semiconductor, cuyo grosor varía entre 250 micro metros y 350 micro metros generalmente cuadrada con una superficie de 100 cm cuadrados.

"Cada célula se compone de una delgada capa de material tipo "n" y otra de mayor espesor de material tipo "p". Ambas capas separadas son eléctricamente neutras, pero al unirlas se genera un campo eléctrico en la unión p-n". (Villaroel, 2013)

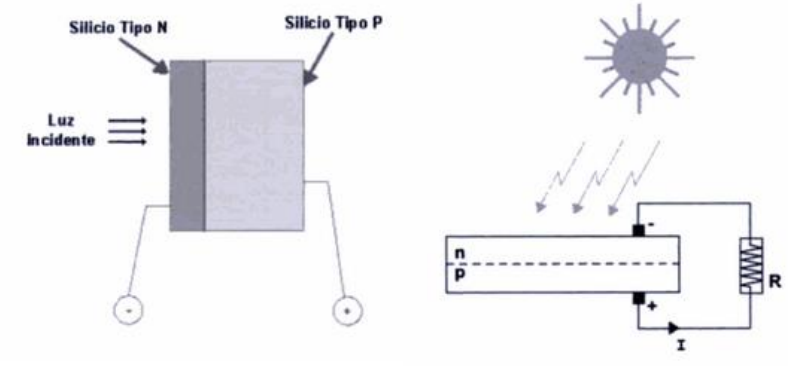


Figura 2. Descripción efecto fotovoltaico. (Perpiñan, 2013)

La cara de la aleación de material tipo N es aquella que es iluminada por la radiación. Mientras la luz siga incidiendo habrá corriente eléctrica y su intensidad será proporción a la luz que reciba dicha célula. Un panel solar está compuesto de la suma y arreglo de varias células solares ordenadas en serie o en paralelo. La mayoría de las células solares están compuestas de material tipo P-N y construida con silicio mono cristalino así mismo La sumatoria de esos arreglos dará como resultado un panel solar, y dichos paneles solares se clasifican principalmente en 3 clases. Mono cristalino, Poli cristalino y amorfos. La principal diferencia entre los diferentes tipos de paneles es su eficiencia de producción energética. (Perpiñan, 2013)

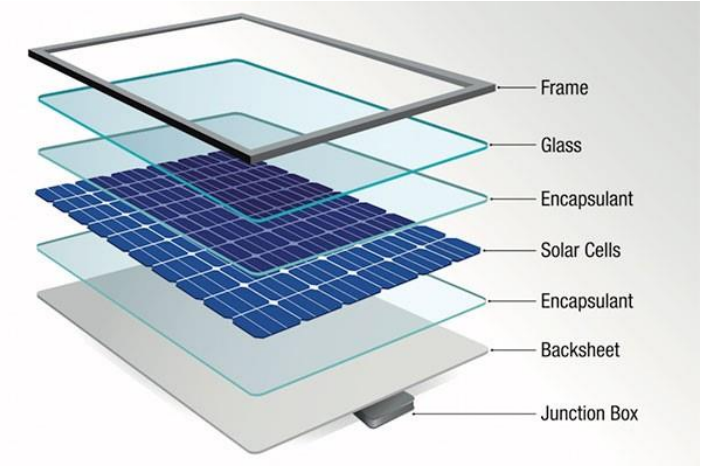


Figura 3. partes de un panal solar. (Vivienda la revista de la construcción, 2019)

1.1.2. **Sistemas fotovoltaicos**

"Un sistema fotovoltaico aquel conjunto de equipos eléctricos y electrónicos los cuales tienen la capacidad de producir energía eléctrica a partir de la radiación solar", los módulos fotovoltaicos forman parte del sistema principal de captación, ya que a su vez este está compuesto por células capaces de transformar la energía lumínica en energía eléctrica de corriente continua. Finalmente, los otros equipos incluidos en un sistema fotovoltaico dependen en gran medida de la aplicación a la que se requiera aplicar. Por último; para generalizar se tiene que los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse en tres grupos. Los conectados a red (grid connected), autónomos (off-grid) y de bombeo. (Mendez & Cuervo, 2011)

1.1.3. **Sistemas autónomos**

Un SFA es aquel que tiene la capacidad de producir energía para satisfacer el consumo de cargas eléctricas de una residencia o lugar según la aplicación solo que este no permanece interconectado a la red eléctrica de las empresas electrificadoras. Estos sistemas emplean un módulo de acumulación energético (baterías) los cuales son generalmente usados con el fin de suplir los periodos donde la radiación solar es insuficiente para generar la energía necesaria. Generalmente estos sistemas son implementados en campos y áreas donde las electrificadoras no alcanzan a suministra el servicio. Dichos sistemas se componen por el generador, un acumulador y un regulador de carga y descarga. "Cuando el consumo incluye cargas de alterna es necesario que el SFA incluya un inversor". En algunos casos el consumo puede estar distribuido entre cargas de corriente continua y corriente alterna, o exclusivamente por cargas en alterna. En la figura 3 se aprecia un modelo de SFA con cargas en DC y AC. (Perpiñan, 2013)

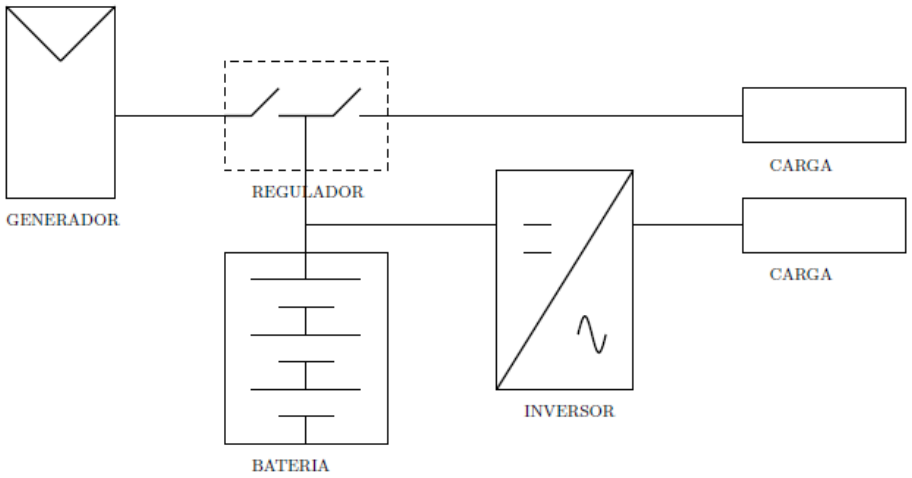


Figura 4. Sistema fotovoltaico Autónomo. (Méndez & Cuervo, 2011)

1.1.4. **Sistema conectado a la red**

Un SFCR es un sistema en el cual la energía producida por este mismo es destinada para atacar parte del consumo del lugar de instalación. En las condiciones adecuadas si el consumo es menor a la energía producida esta podrá ser inyectada en la red convencional. en la figura 5, se puede apreciar la configuración en diagrama de un SFCR el cual se compone del módulo o celda fotovoltaica, un inversor DC/AC y protecciones eléctricas para evitar riesgos en las instalaciones. La generación de energía por este tipo de sistemas es consumida generalmente de manera parcial o totalmente en el lugar de donde fue instalado. Es común que en los países se generen mecanismos de beneficios económicos que compensan al propietario del sistema por la energía que su sistema entrega a la red eléctrica. (Perpiñan, 2013)

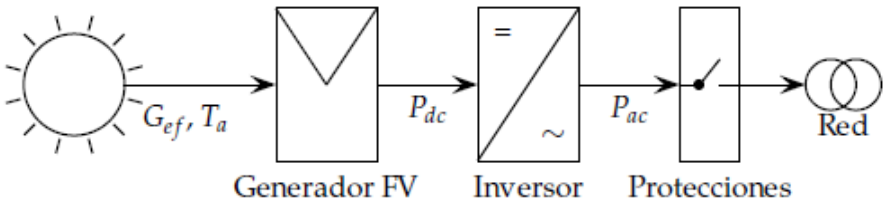


Figura 5. Sistema fotovoltaico Conectado a la red. (Méndez & Cuervo, 2011)

1.1.5. **Sistemas de almacenamiento**

Un sistema de almacenamiento es aquel que tiene la capacidad de guardar un elemento ya sea líquido, solido, gaseoso o para este caso energía eléctrica; para luego disponer de ella en otro momento. El dispositivo por excelencia que se utiliza para almacenar energía DC son las baterías las hay de diferentes compuestos, alcaninas, de plomo acido, de litio entre otros. Estas básicamente son súper condensadores y sus aplicaciones en las renovables son de bastante ayuda, aunque también existen otros tipos de almacenamiento energético para otros tipos de energía como lo son tanques que permiten almacenar líquidos, o tanques para almacenar gases. Según el diseño y aplicación requerida habrá un sistema de almacenamiento ideal. (Clemente, 2012)

En cuanto al tema de energías renovables se profundiza cada vez más en el hidrogeno verde como fuente de combustible o como fuente de generación de energía eléctrica gracias al proceso de electrolisis inversa la cual permite obtenerse a partir del agua. Su consumo en una pila de combustible libera energía y agua, esta última en la misma cantidad inicial necesaria para su obtención. Se cierra así un ciclo en el que mediante energías renovables se produce hidrógeno y se utiliza éste mediante una reacción electroquímica liberando energía y el agua que se necesitó para su obtención. Actualmente, el sistema de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno más habitual está compuesto por un electrolizador, un almacenamiento de hidrógeno y una pila de combustible. Centrándonos por ejemplo en un parque eólico, en ocasiones es necesario parar alguna de sus turbinas eólicas por falta de capacidad de la red eléctrica para evacuar la energía eléctrica generada. Gracias al almacén de energía mediante el hidrógeno no sería necesario parar la turbina eólica, ya que con el excedente de energía que la red eléctrica no es capaz de absorber se alimentaría a un electrolizador generándose hidrógeno que se almacenaría para ser posteriormente utilizado mediante pila de combustible para generar energía eléctrica cuando la red tenga capacidad de absorberla. (Clemente, 2012)

Actualmente se está investigando intensamente en componentes tanto de pilas de combustible como de electrolizadores con el objeto de reducir costos y hacer más competitiva la tecnología del hidrógeno y las pilas de combustible.

1.1.6. **Electrolisis del agua**

La electrolisis del agua será el método de obtención de hidrógeno que tomaremos como objetivo de estudio. En la Figura 6 aparece un esquema gráfico del funcionamiento de un proceso de electrolisis general. (Romero, 2018)

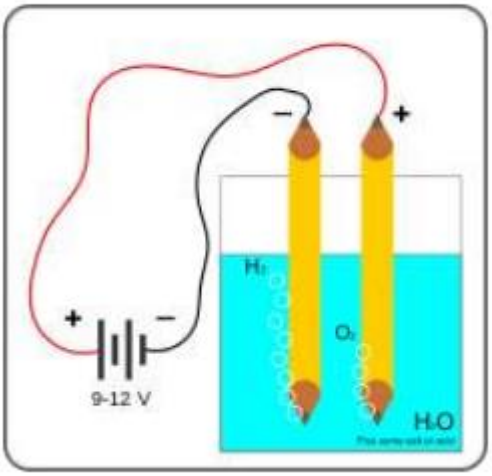


Figura 6. Sistema fotovoltaico Conectado a la red. (Romero, 2018)

Normalmente, se añade un electrolito fuerte (por ejemplo, hidróxido de sodio NaOH), para aumentar la conductividad del agua mejorando de esta forma la transmisión de corriente. Se conecta la fuente de energía a los dos electrodos, fabricados normalmente con metales inertes para que no intervengan en la reacción (acero inoxidable y platino los más usuales) que estarán en contacto con el agua. Aparecerá una carga en cada uno de los electrodos, por lo que pasarán a diferenciarse a partir de ahora como cátodo (cargado negativamente, electrodo en el que se producirá la reacción de reducción) y ánodo (cargado positivamente, en este electrodo se produce la reacción de oxidación). (Romero, 2018)

1.1.7. **Celdas de combustible PEM**

Una celda PEM está conformada, como toda celda electrolítica, por un ánodo, un cátodo y un electrolito. En una celda PEM esto es el conjunto membrana-electrodo. En este conjunto, una membrana polimérica hace la función de electrolito y el todo está contenido entre dos placas metálicas llamadas placas bipolares, lo que forma una mono celda (fig.2). Las placas bipolares sirven para suministrar los gases y como elemento de conexión electrónica entre mono celdas.

El principio de operación de una celda PEM está representado en la figura 7. El proceso inicia con el suministro de hidrógeno y oxígeno a una presión definida. El combustible se distribuye uniformemente a través de los canales de las placas bipolares para alcanzar el ánodo de la celda (A). Por otro lado, el oxígeno puro de un tanque, o el aire proveniente de un compresor sigue un camino similar, pero en el lado del cátodo (B). (hidrogeno, s.f.)

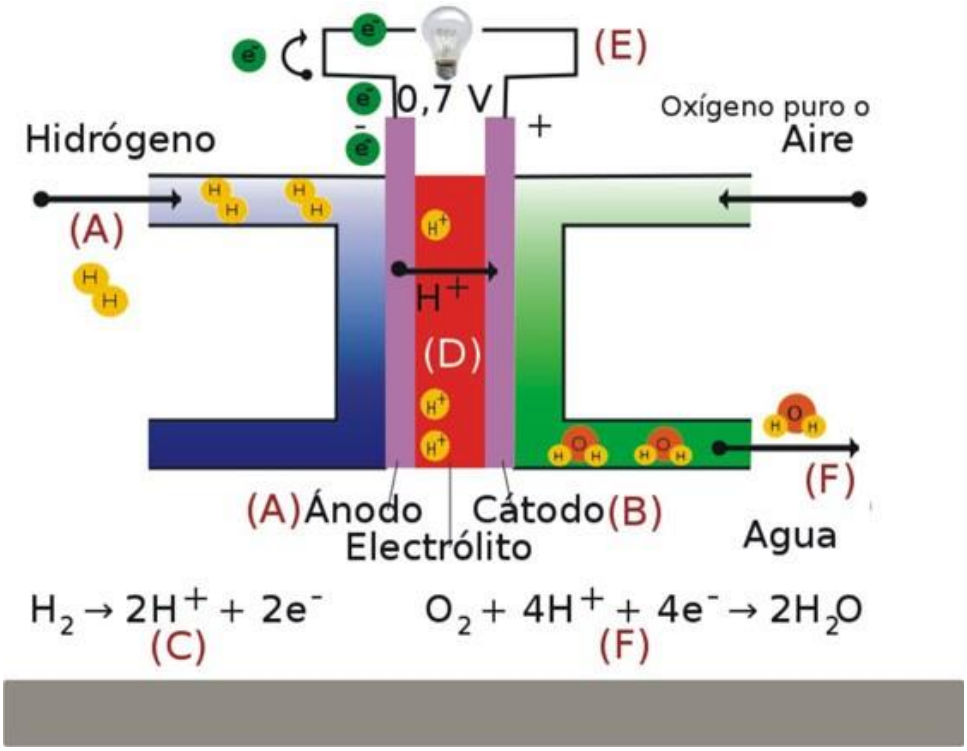


Figura 7. Partes de una celda de combustible. (Revistahypatia)

1.1.8. **Hidrogeno verde**

El hidrógeno (H) es el primer elemento de la tabla periódica, es el más simple y uno de los más abundantes en el planeta, sin embargo, no se encuentra en estado puro en la naturaleza, sino que se combina con otros elementos generando diferentes tipos de moléculas, principalmente orgánicas, como el agua (H2O), amoniaco (NH3), hidrocarburos como el benceno (C6H6), entre otros. En condiciones estándar de temperatura y presión forma un gas (H2) inflamable, incoloro, inodoro, no tóxico e insoluble en agua. En los últimos años la popularidad del hidrógeno ha aumentado considerablemente debido a varios factores, uno de los más importantes es su proceso de combustión, en el cual se produce una gran cantidad de energía y su subproducto es vapor de agua, ningún gas derivado del carbón es emitido durante dicho proceso, por lo tanto, se contempla como un sustituto carbono-neutral de los combustibles fósiles tradicionales los cuales durante su combustión suelen producir gases de efecto invernadero como el dióxido (CO2) o el monóxido de carbono (CO). En general la cadena de producción consta de 3 partes principales, la producción, el almacenamiento y el transporte. Además, se incorporan las principales aplicaciones tanto para los sistemas eléctricos como el uso del H2 en diferentes industrias, destaca además su uso como combustible pues dado el alto calor de combustión. (Jimenez F. , 2020)

Para el caso de generación de hidrogeno a partir de las energías renovables se aprovecha el hecho que exista ya sea un sistema eólico o un sistema solar y que estos tengan menos demanda que producción, se puede aprovechar dicha energía sobrante para alimentar un sistema de generación de hidrogeno y poder aprovechar dicho potencial para cuando se requiera.

Celdas Generadoras de Hidrógeno: Húmedas, Secas y Gas Hidroxi

Las celdas generadoras de hidrógeno se dividen en dos categorías principales: húmedas y secas. Las **celdas húmedas** son las más comunes y utilizan una solución electrolítica líquida para separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. Son de bajo costo, fáciles de construir y mantener, pero tienen menor eficiencia y mayor riesgo de fugas que las **celdas secas**, que usan un electrolito sólido. Las celdas secas son más eficientes, duraderas y seguras, pero también más costosas y con tecnología menos desarrollada.

Celdas de Gas Hidroxi (HHO) y Gases Separados:

Las **celdas HHO** son un tipo de celda húmeda que produce una mezcla de hidrógeno y oxígeno (gas HHO) ideal para alimentar motores de combustión interna. Son de bajo costo y fáciles de construir, pero menos eficientes que las de hidrógeno puro y el gas HHO es explosivo. Las **celdas de gases separados** producen hidrógeno y oxígeno por separado, lo que permite un mayor control y flexibilidad en su uso. Son más eficientes que las celdas HHO, pero también más costosas y con tecnología más compleja.

5.3. Marco Legal

La regulación y normatividad relacionada con el tema de energías renovables y generación de este tipo de energías se encuentra en una etapa inmadura en la legislación colombiana. Algunas de las leyes que existen actualmente en el país se concentran más que todo en los incentivos económicos que pueden recibir personas naturales y jurídicas por tener proyectos de este tipo, adicionalmente también en la parte tributaria todo lo relacionado con energías renovables está exento de IVA. Por último, se encontraron estas dos principales leyes que resumen un poco del tema de las energías renovables en el país.

5.3.1. **Ley 1665 del 2013**

En Colombia se empieza a hablar del Derecho a un Ambiente Sano, a partir de la promulgación de la Constitución Política de Colombia 1991, donde se hace referencia a este derecho en su artículo 79, estableciendo que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano y se estipula el deber del Estado de protegerle en su integridad y diversidad. Las Fuentes de Energía Renovable surgen en Colombia mediante la ratificación del Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), hecho en Bonn, Alemania, el cual fue aprobado a través de la Ley 1665 de 2013. Anteriormente se intentó regular mediante la Ley 697 de 2001, pero es a partir de la ratificación del estatuto de IRENA, que Colombia

considera la implementación de estas energías renovables, como una opción para reemplazar la utilización de energías fósiles, con el objetivo de favorecer a un medio ambiente más limpio. (Guerra, et al, 2021)

Ley 1715 del 2014

La Ley 1715 de 2014 tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las Zonas No Interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético de aquellas regiones donde las centrales de energía no alcanzan a llegar con el suministro de energía. Los interesados en realizar inversiones en proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía y Gestión Eficiente de la Energía, podrán acceder a los incentivos tributarios enunciados por la Ley, una vez se cumplan los requisitos y procedimientos establecidos por las entidades pertinentes. Dichos incentivos son los siguientes:

- **Deducción especial en la determinación del impuesto sobre la renta.**

Los contribuyentes declarantes del impuesto sobre la renta que realicen directamente nuevas erogaciones en investigación, desarrollo e inversión para la producción y utilización de energía a partir FNCE o gestión eficiente de la energía, tendrán derecho a deducir hasta el 50% del valor de las inversiones. El valor a deducir anualmente no puede ser superior al 50% de la renta líquida del contribuyente.

- **Depreciación acelerada.**

Gasto que la ley permite que sea deducible al momento de declarar el impuesto sobre la renta, por una proporción del valor del activo que no puede superar el 20% anual.

- **Exclusión de bienes y servicios de IVA.**

Por la compra de bienes y servicios, equipos, maquinaria, elementos y/o servicios nacionales o importados.

- **Exención de gravámenes arancelarios**.

Exención del pago de los Derechos Arancelarios de Importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de pre-inversión y de inversión de proyectos con FNCE.[19]

5.3.2. **Ley 1955 de 2019**

para el sector de las energías renovables, se ha establecido un incentivo adicional en el art. 175 de la Ley 1955 de 2019 del Plan Nacional de Desarrollo (PND) a partir del cual estarán exentos del IVA elementos empleados en proyectos de energía solar como: inversores, paneles solares y controladores de carga. Esta ley cuenta con la amplia ventaja de ser actualmente un proceso directo que no requiere trámite alguno para excepción del IVA en estos tres equipos, lo cual ayuda al consumidor a la hora de adquirir dichos elementos. [20]

5.3.3. **Ley 2099 del 2021**

esta ley se crea como una extensión a la ley 1715 del 2014 en la cual se logran agregar varios puntos interesantes de los cuales tomaremos algunos fragmentos que son los que realmente interesan Para este documento ya que la mayoría son de incentivo tributarios:

Artículo 5°.
Adiciónense los siguientes numerales al artículo 5° de la Ley 1715 de 2014: 23. Hidrógeno Verde: Es el hidrógeno producido a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable, tales como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, el calor geotérmico, la solar, los mareomotriz, entre otros; y se considera FNCER. 24. Hidrógeno Azul: Es el hidrógeno que se produce a partir de combustibles fósiles, especialmente por la descomposición del metano (CH4) y que cuenta con un sistema de Captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS), como parte de su proceso de producción y se considera FNCE.
Artículo 7°.
Modifíquese el artículo 10 de la Ley 1715 de 2014, que quedará de la siguiente manera:
Artículo 10. Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge). Créese el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge) como un patrimonio autónomo que será administrado a través de un contrato de fiducia mercantil que deberá ser celebrado por el Ministerio de Minas y Energía. El objeto del Fenoge será promover, ejecutar y financiar planes, programas y proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable, y Gestión Eficiente de la Energía.
El Fenoge será reglamentado por el Ministerio de Minas y Energía, incluyendo la creación de un manual operativo y un comité directivo, atendiendo a los siguientes criterios mínimos:
Artículo 21. Promoción a la producción y uso del hidrógeno. El Gobierno nacional definirá los mecanismos, condiciones e incentivos para promover la innovación,
Investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso de hidrógeno destinado a la prestación del servicio público de energía eléctrica, almacenamiento de energía, y descarbonización de sectores como transporte, industria, hidrocarburos, entre otros.
Parágrafo 1°. El Hidrógeno Verde y Azul les serán aplicables integralmente las disposiciones de la Ley 1715 de 2014 o aquella que la reemplace, sustituya o modifique.
Parágrafo 2°. Las inversiones, los bienes, equipos, y maquinaria destinados a la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, reelectrificación, investigación y uso final del Hidrógeno Verde y Azul, gozarán de los beneficios de deducción en el impuesto de renta, exclusión de IVA, exención de aranceles y depreciación acelerada establecidos en los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014, para lo cual se deberá solicitar certificación de la UPME como requisito previo al aprovechamiento de los mismos. El Gobierno nacional reglamentará la materia.
Parágrafo 3°. El Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge) podrá financiar y/o ejecutar proyectos de producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, reelectrificación y uso de Hidrógeno verde, con sus recursos o a través de recursos otorgados por el Ministerio de Minas y Energía o cualquier otra entidad pública, privada o mixta, así como por organismos de carácter multilateral e internacional. Para el efecto, el Fenoge, a través de su entidad administradora, podrá celebrar en forma directa convenios o contratos con las entidades estatales de cualquier orden, para ejecutar los planes, programas y/o proyectos, así como los recursos destinados a la promoción y desarrollo de FNCE, hidrógeno y GEE. [21]

6. Metodología

Este proyecto consta de varias fases de planeación y ejecución las cuales fueron analizadas de inicio a fin, dando como resultado el siguiente listado.

1. Necesidad del proyecto
2. Compras y adquisiciones
3. Diseño de planos
4. Ensamble
5. Pruebas

6.1. Necesidad del proyecto

Inicialmente se plantean las necesidades del proyecto basado en el análisis de los objetivos específicos de este mismo. Teniendo en cuenta eso; Se plantea mediante el siguiente diagrama los requisitos que deberá tener el montaje a realizar para así dar solución a los objetivos planteados.

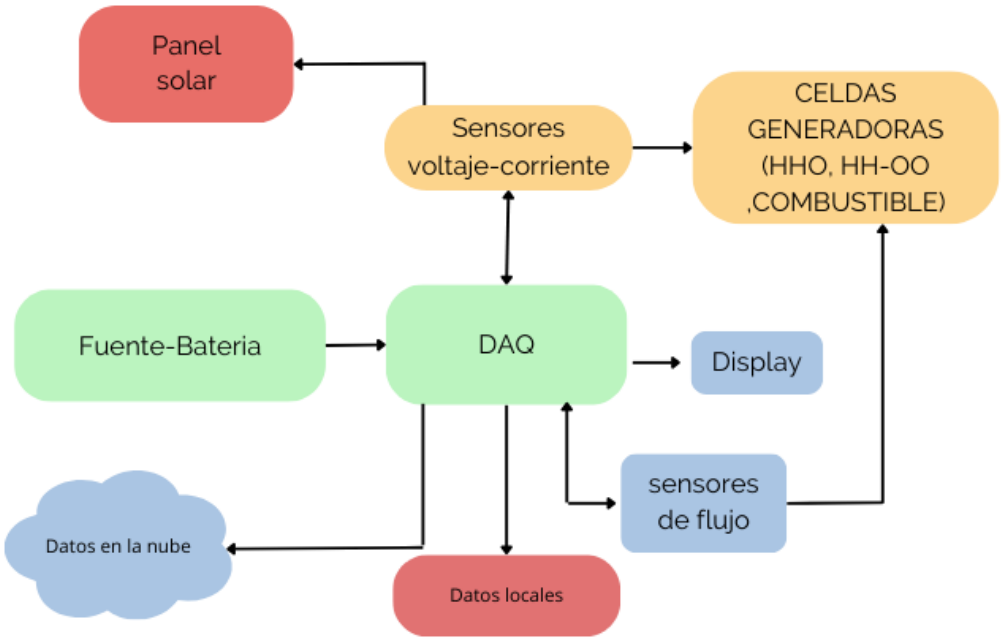


Figura 8. Diagrama de solución inicial. Fuente propia.

Ahora al analizar la imagen anterior se entiende que para poder llevar a cabo el proyecto es necesario realizar el desarrollo y montaje de una tarjeta de adquisición de datos que permita incorporar los siguientes elementos:

- Alimentación de entrada de 12-24 VDC
- Salidas de 10V, 5V, 3,3 V
- Respaldo de Batería de 14.8 V
- Entradas de Sensores de corriente
- Entrada Sensores de voltaje,
- Entrada de sensores de flujo volumétrico para medir la cantidad de hidrogeno generado
- Microcontrolador
- Display oled para visualizar algunas variables
- Registrador de datos
- RTC

Adicionalmente se debe adquirir para el ensamble y acople del proyecto los siguientes objetos.

- Gabinete eléctrico
- Panel solar 18V
- Controlador MPPT
- Celda de combustible
- Kit Celda generadora de gas hidroxi (HHO)
- Kit Celda separadora de gases HH-OO
- Tuberías y racores para el acople liquido-gaseoso
- Tanques de almacenamiento y purificación de gases
- Materiales químicos para las reacciones de las celdas generadoras
- Herramienta y protecciones

6.2. Compras y Adquisiciones

Teniendo en cuenta la información del punto 6.1 y el listado de requerimientos se procede a revisar los componentes a comprar

6.3. Diseños y planos

Esta etapa se divide en dos categorías, la primera la parte electrónica donde se tendrán en cuenta los módulos a incorporar y la segunda la parte neumática donde se tendrá en cuenta las conexiones que se deben realizar a las celdas para que funcionen correctamente sin presentar algún peligro debido a su manipulación.

6.3.1. Parte electrónica

Se diseñan los planos para la parte de potencia, la cual admite una fuente de 16 o más voltios DC (máximo 24 V), Mediante la implementación de circuitos, se generan:

- 15 V: Se utiliza un regulador de voltaje LM317 en configuración fija de 15 V. Este circuito es simple y económico lo cual nos permitirá generar el voltaje de alimentación para la carga de batería en caso de ausencia de la fuente principal.
- Bornera para incorporar la entrada de la fuente y alimentar el circuito.
- Bornera para conectar una batería de 14.8 V y 1.200 mAh.

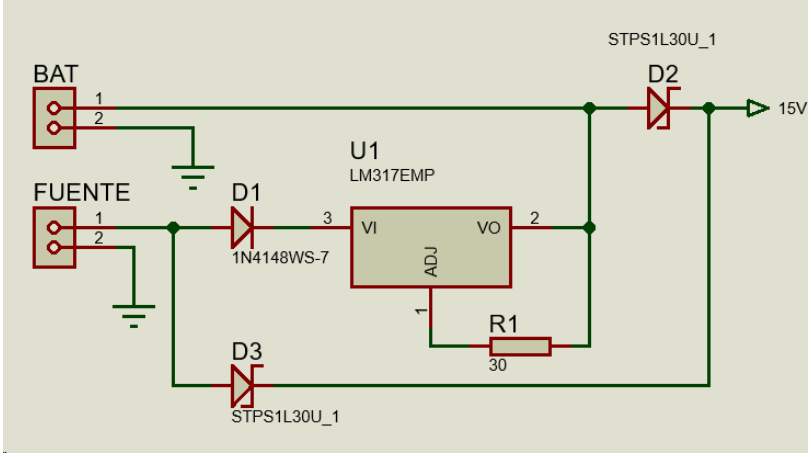


Figura 9. Admisión de fuente y carga de batería. Fuente propia.



Figura 10. Batería 14.8 V. Fuente propia

- 10 V: Se utiliza un regulador de voltaje lineal LM317 en configuración fija de 10 V, lo cual nos permitirá generar el voltaje de alimentación para los sensores de flujo.

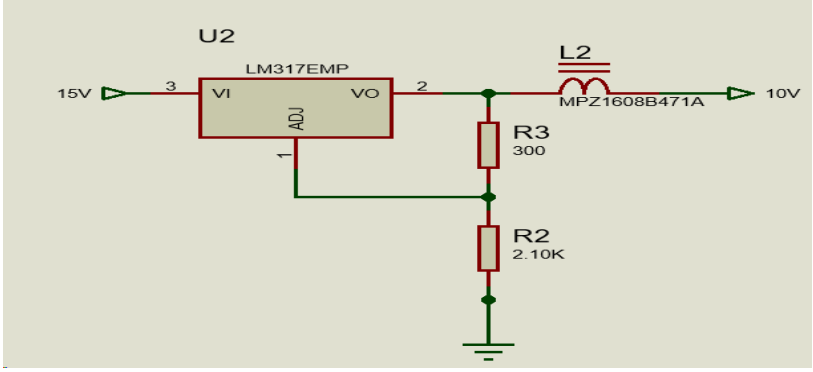


Figura 11. Circuito de 10 VDC. Fuente propia.

- 5 V: Se utiliza un regulador de voltaje lineal LM7805. Con el fin de energizar la mayoría de módulos sensores, y el MCU en la placa a implementar.

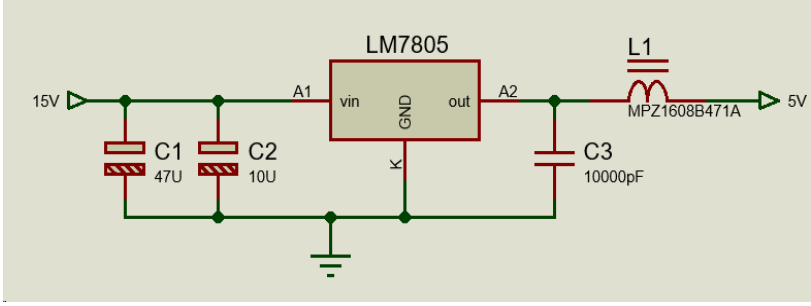


Figura 12. Circuito de 5 VDC. Fuente propia.

- 3.3 V: Se obtiene directamente del microcontrolador. La mayoría de los microcontroladores modernos pueden proporcionar 3.3 V a través de un pin dedicado.
- Borneras para permitir la salida de los voltajes generados y alimentar los diferentes sensores conectados a la tarjeta de adquisición de datos.

Para la parte de control, gestión de comunicaciones y como corazón del proyecto se incorpora un microcontrolador ESP82866 NodeMCU, el cual es implementado en proyectos de IoT debido a su conectividad Wi-Fi y facilidad de uso. Algunas de las características que tiene este microcontrolador son las siguientes:

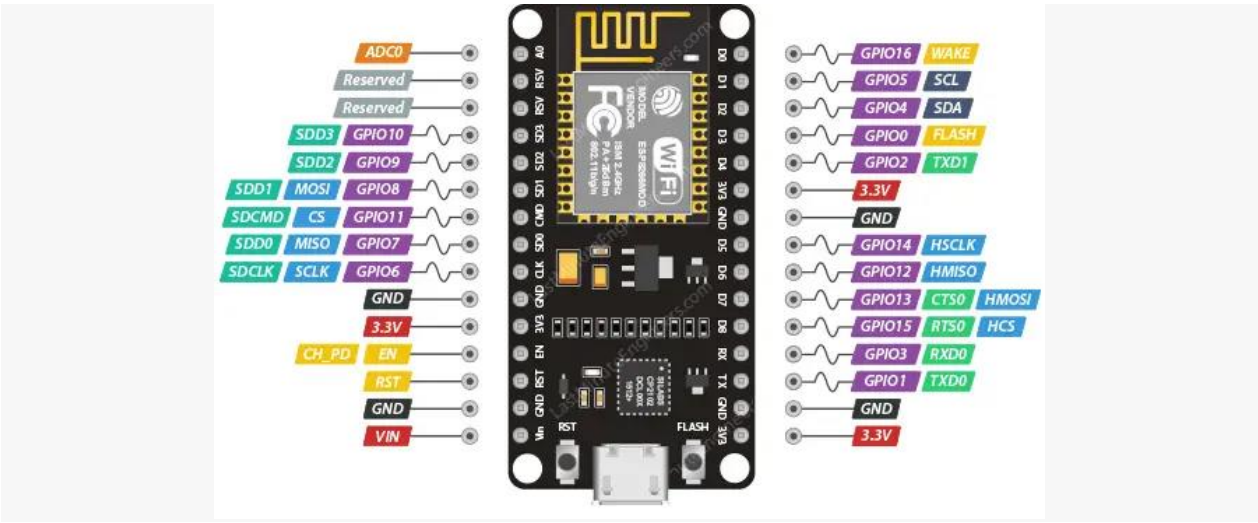


Figura 13. NodeMCU ESP8266. (Last Minute Engineers , s.f.)

Interfaces de Comunicación

Wi-Fi: integra un módulo Wi-Fi que permite la conexión a redes existentes o la creación de una red propia.
Serial (UART): Dispone de pines para comunicación serie (TX y RX) para conectar a otros dispositivos ya sea desde el puerto USB o los pines de conexión de la tarjeta.
I2C: Tiene soporte para comunicación I2C, lo que permite conectar sensores y otros dispositivos compatibles con este protocolo.
SPI: Proporciona pines para comunicación SPI, útil para conectar sensores, pantallas y otros periféricos.

Salidas y entradas:
El NodeMCU ESP8266 tiene 16 pines GPIO disponibles para conectar dispositivos externos. Estos pines pueden configurarse como entradas o salidas digitales.
Además, hay un pin analógico (A0) que permite leer valores analógicos, como los provenientes de sensores de luz o potenciómetros. La resolución del ADC es de 10 bits, lo que significa que proporciona valores entre 0 y 1023.

En el caso de los sensores selecciones para el proyecto se tienen los siguientes ya que cumplen con las características necesarias y son de fácil adquisición.

Módulos sensores de voltaje INA3221:

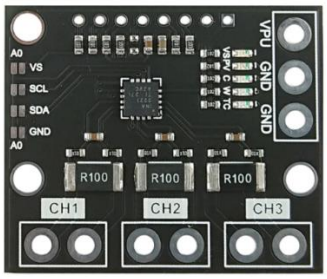


Figura 14. Modulo Sensor INA 3221 (Zamper Store, s.f.)

- Función: Monitorear el voltaje de la celda de combustible, las celdas generadoras de hidrogeno, y el panel solar.
- Cada módulo permite medir hasta 4 diferentes dispositivos
- Rango de medición: ±26 V.
- Resolución: 12 bits.
- Precisión: ±0.1%.
- Interfaz de comunicación I2C.

Módulos sensores de corriente INA219:

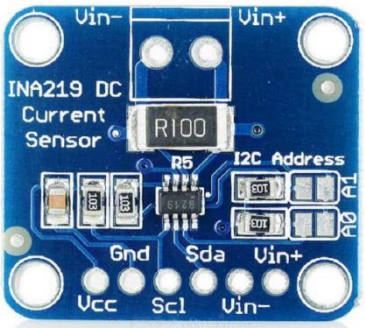


Figura 15. Modulo Sensor INA 219 (AdaFruit , s.f.)

- Función: Medir la corriente de la celda de combustible, las celdas generadoras de hidrogeno, y el panel solar.
- Cada módulo solo permite el monitoreo de un solo dispositivo
- Rango de medición: ±2 A.
- Resolución: 12 bits.
- Precisión: ±0.1%.
- Interfaz de comunicación I2C.

Módulo conversor analógico-digital ADS1115:

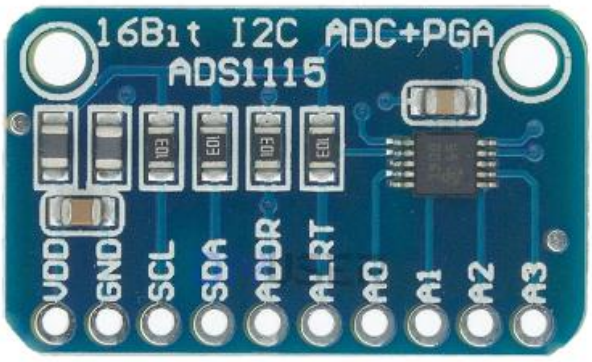


Figura 16. Modulo ADC ADS1115. (Electronilab, s.f.)

- Función: Convertir señales analógicas en señales digitales que pueden ser procesadas por el microcontrolador.
- Cada módulo permite medir hasta 4 diferentes dispositivos
- Resolución: 16 bits.
- Rango de entrada: ±5 V.
- Velocidad de conversión: 860 SPS.
- Interfaz de comunicación I2C.

Display OLED 128x64:

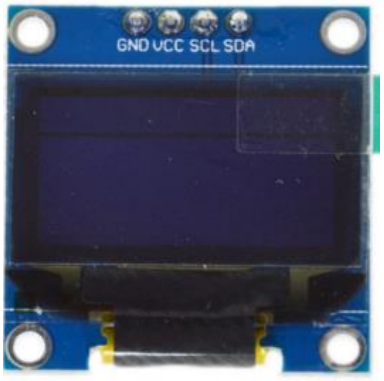


Figura 17. Display OLED (Ebay, s.f.)

- Función: Mostrar información al usuario.
- Resolución: 128x64 píxeles.
- Interfaz de comunicación I2C.

Módulo Dataloger micro SD-RTC DS1307:

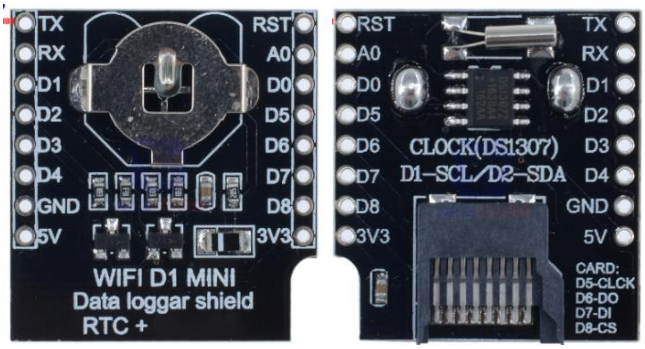


Figura 18. Modulo RTC-Datalogger . (Aliexpress, s.f.)

- Función: Mantener la hora, fecha, guardar datos programados.
- Interfaz de comunicación I2C y SPI.
- Necesita Batería de respaldo CR1220 y memoria SD externa
- Reloj de alta precisión.

Sensor de flujo Winsen F1012:



Figura 19. Sensor de flujo volumétrico (Winsen, 2020)

- Función: Medir el flujo de gas que generan las salidas de las celdas
- Cada módulo solo permite el monitoreo de un solo dispositivo

- Rango de medición: 50 a 1000 SCCM.
- Exactitud: ±1.5%.
- Alimentación: 10 V.
- Escala máxima de voltaje (EMV) de salida: 5V.
- Escala mínima de voltaje (EmV) de salida: 1V.
- Tipo de sensor: Analógico.

Fórmula para calcular el flujo actual

$$Flujo\ actual = \frac{Rango\ de\ medicion\ maxima * (voltaje\ actual\ de\ salida - EmV)}{(EMV - EmV)} \quad (1)$$

$$Flujo\ actual = \frac{1000\ sccm * (voltaje\ actual\ de\ salida - 1V)}{(5V - 1V)} \quad (2)$$

Módulo Regulador MPPT 5A:



Figura 20. Regulador MPPT 5ª (Amazon, s.f.)

- Función: regular en voltaje de salida del panel solar hacia las celdas generadoras de hidrogeno
- Propiedades del módulo: Módulo de buck no aislado (BUCK)
- Voltaje de entrada: 6 ~ 36 V
- Voltaje de salida: 1.25 ~ 32 V continuamente ajustable
- Gama de ajuste de tensión MPPT: 6 ~ 36 V
- Rango de corriente de salida: 0.05 ~ 5A (La corriente de salida predeterminada es 3A)
- Temperatura de funcionamiento: -40 ~ +85 grados
- Frecuencia de funcionamiento: 180 KHz

- Eficiencia de conversión: hasta 95% (eficiencia, tensión de entrada y salida, corriente y presión)
- Protección contra cortocircuito: Sí
- Sobre la protección de la temperatura: Sí (apague automáticamente la salida después de sobre temperatura)
- Protección contra inversión de polaridad de entrada: Ninguna, (si es necesario, agregue la cadena al diodo)
- Indicador de carga: carga roja, verde brillante cuando está completamente cargada. La lámpara de giro es la detección de corriente de salida.

Panel solar monocristalino 60W:

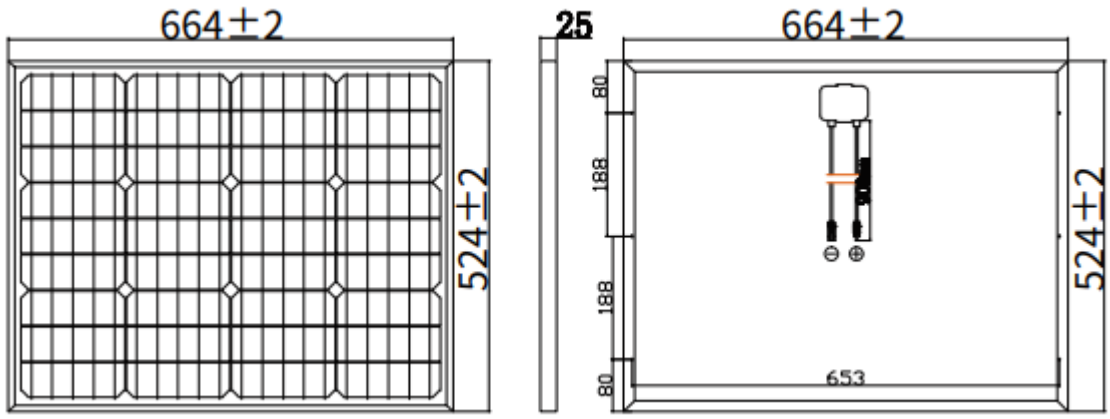


Figura 21. Dimensiones panel solar (Sunera)

- Función: Entregar el voltaje al sistema de celdas generadoras
- Propiedades:
- Potencia máxima: 60W
- Corriente de cortocircuito: 3.39 A
- Voltaje en circuito abierto: 22.68 V
- Corriente máxima: 3.15 A
- Voltaje máximo: 19.08 V

Después de validar los módulos electrónicos a incorporar en el proyecto se procede a completar la parte inteligente del proyecto dando como resultado el plano siguiente:

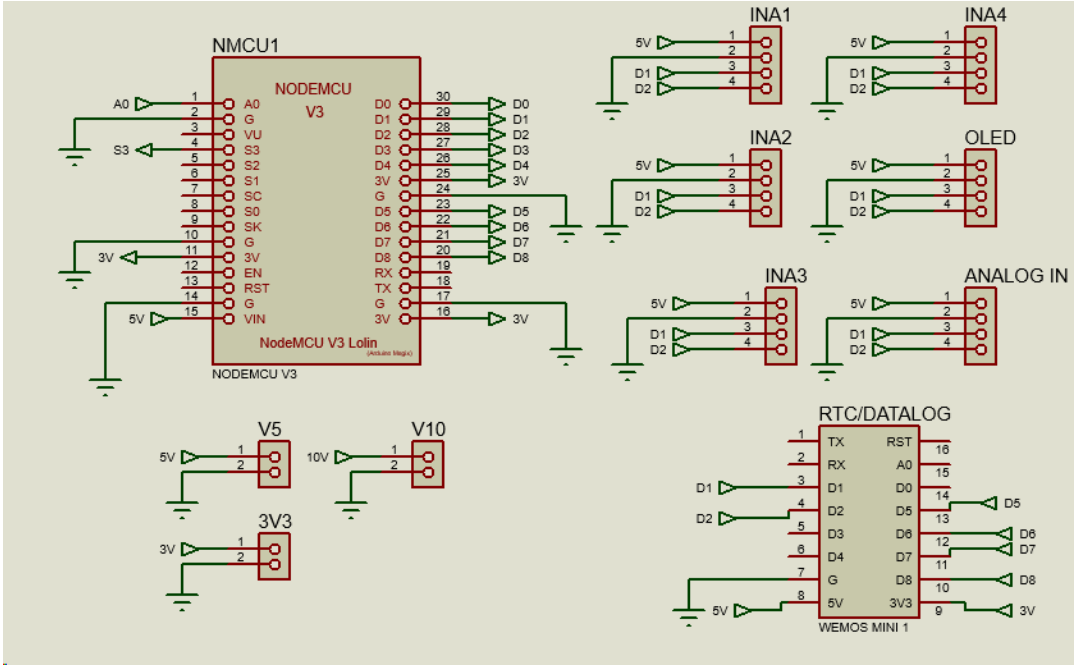


Figura 22. Circuito de acoples MCU con sensores. Fuente propia.

Por último, se anexan circuitos de tipo divisor de voltaje para acondicionar la señal de salida de los sensores hacia el MCU y así evitar que un voltaje no deseado dañe el circuito.

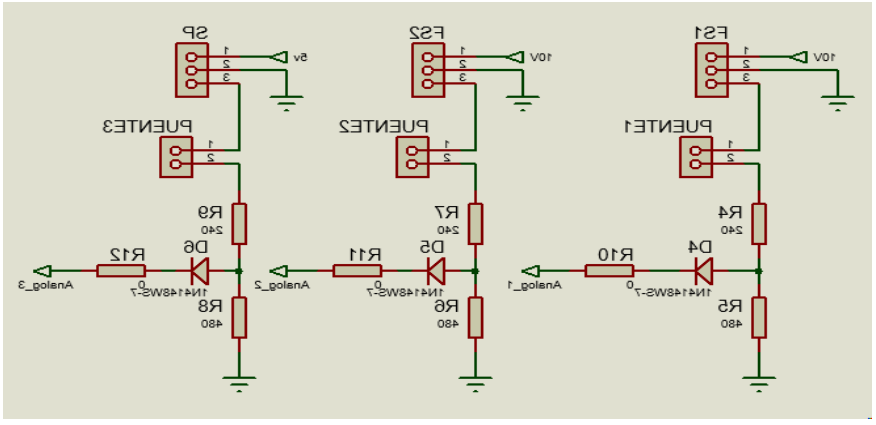


Figura 23.Acondicionamiento de sensores. Fuente propia.

6.3.2. Parte neumática

Para esta etapa del proyecto se tuvo en cuenta que la celda generadora de HHO necesita un tanque mixto que permita el ingreso de agua mezclada con el electrolito y al mismo tiempo salida de gas hidroxi generado por la celda, este gas retorna al tanque principal y por la parte superior pasa a través de otro tranque tipo filtro para eliminar restos de soda caustica en el gas y así purificar la mezcla y dejarla lista para su uso.



Figura 24. Celda de HHO. Fuente propia.

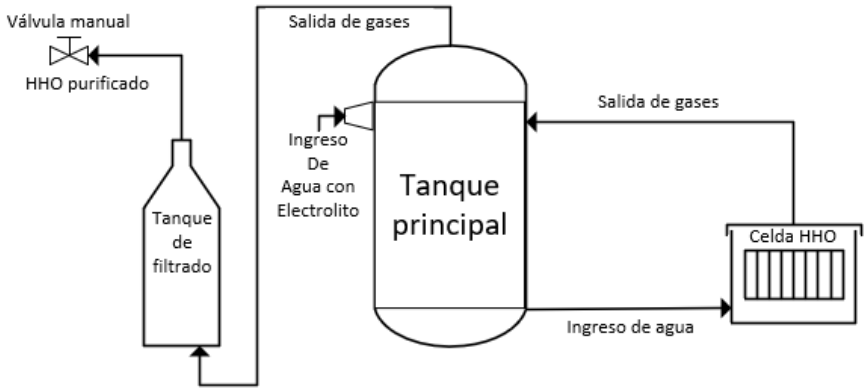


Figura 25. Sistema celda de HHO. Fuente propia.

La celda separadora de gases tiene dos tanques interconectados en la parte inferior que permiten el ingreso del agua con el electrolito. Esta mezcla se encuentra distribuida en la parte

inferior de estos tanques, pero solo hasta cierto punto, ya que en la parte superior ingresan los gases separados, que luego pasan por otros tanques tipo filtro para eliminar residuos de soda cáustica. Finalmente, la salida del tanque de filtrado de hidrógeno se conecta con la entrada de la celda de combustible.



Figura 26. Celda separadora de gases. Fuente propia.

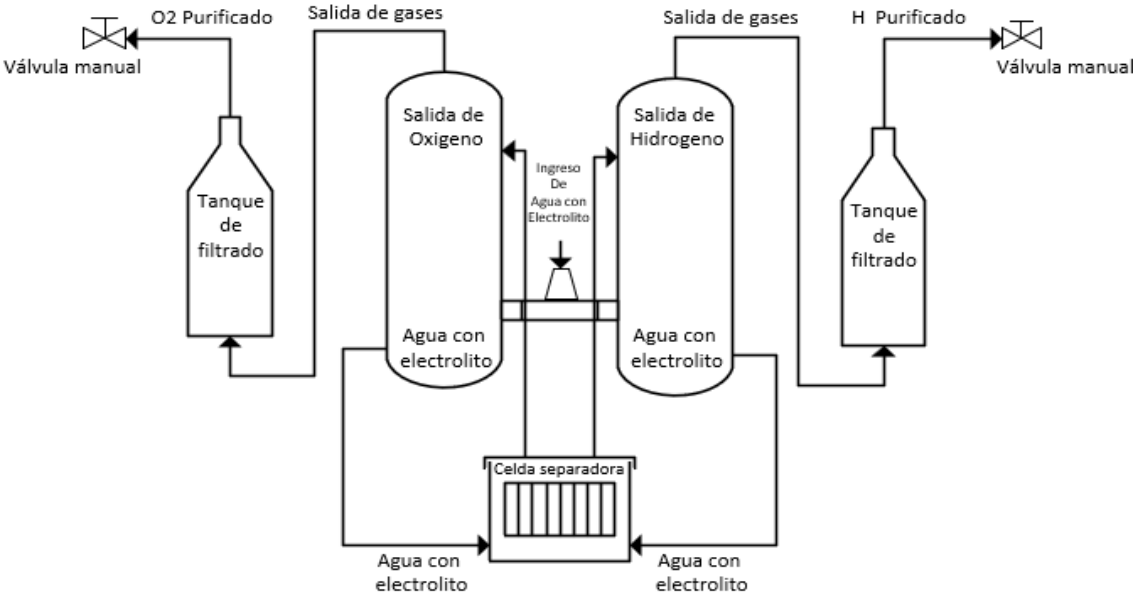


Figura 27. Diagrama P&ID de las celdas. Fuente propia.

Por último, la salida del tanque purificador es el ingreso de la celda de combustible. Se encontró en el mercado chino una celda para prototipado la cual cumple con algunas características principales y nos permite realizar el laboratorio sin problemas

- Función: Convertir el Hidrogeno en voltaje mediante proceso electro químico
- Potencia nominal: 10 W
- Voltaje nominal: 6V
- Corriente nominal: 1.67 A
- Rango de salida 5-9 V
- Eficiencia: >50%
- Pureza de ingreso: >99%
- Presión requerida: 0.04-0.05 Mpa
- Consumo: 116.9 ml/ min

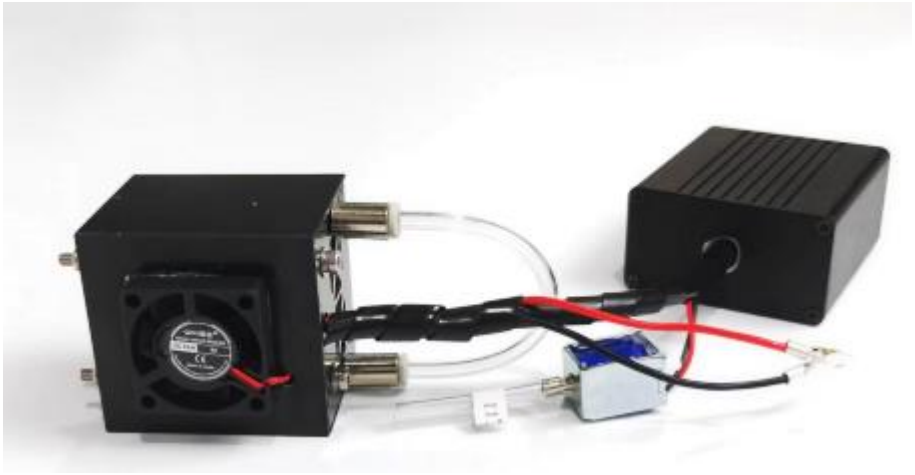


Figura 28. Celda de combustible. Fuente propia.

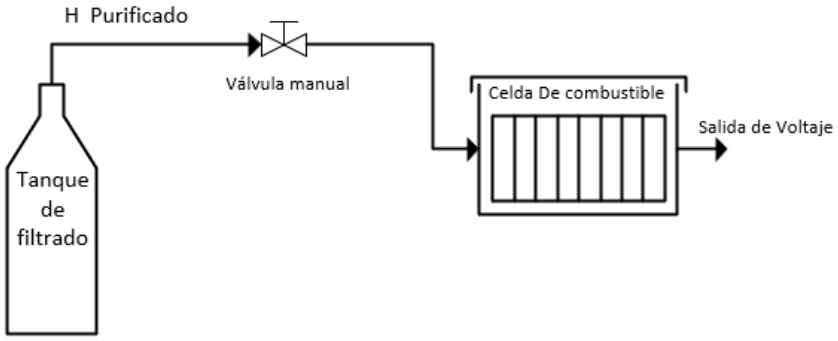


Figura 29. Diagrama Celda de combustible. Fuente propia.

6.4. Montaje

Para esta parte del proyecto una vez diseñados los planos se procede a realizar el. Diseño de la PCB, Adquisición de los elementos necesarios para poder ensamblar y poner todo junto para así realzar las pruebas pertinentes de laboratorio que plantea este proyecto:

6.4.1. Montaje en PCB

Se utilizó el servicio de PCBway para realizar el ensamble de la PCB, Si bien el proceso de entrega del servicio de ensamble de PCB de PCBway presentó un retraso, la calidad del producto final fue excepcional. Como se aprecia en la figura 30, el resultado final supera con creces las expectativas establecidas en el diseño original de la PCB, ilustrado en la figura 29. La precisión en la fabricación y el ensamblaje de los componentes son evidentes, dando como resultado un producto robusto y funcional.

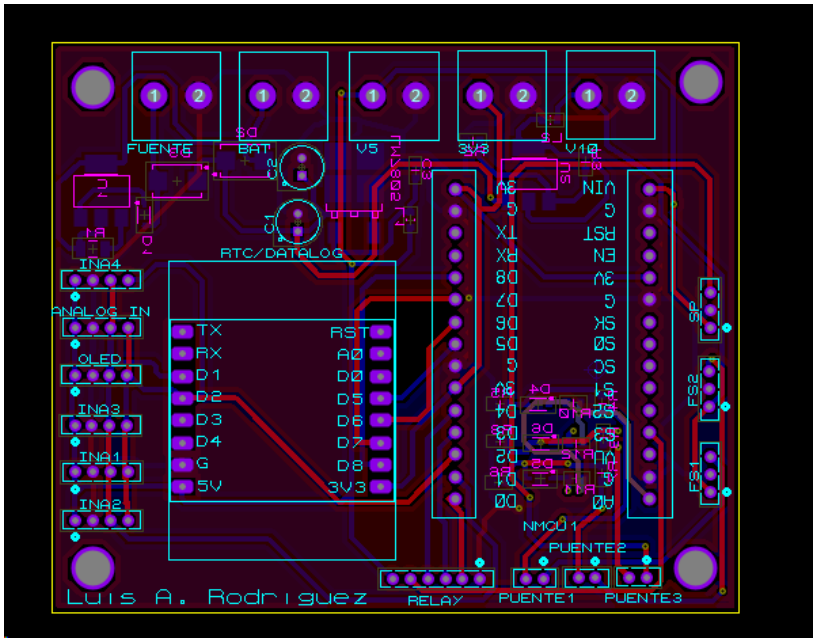


Figura 30. Diseño de PCB plano de pistas. Fuente propia.

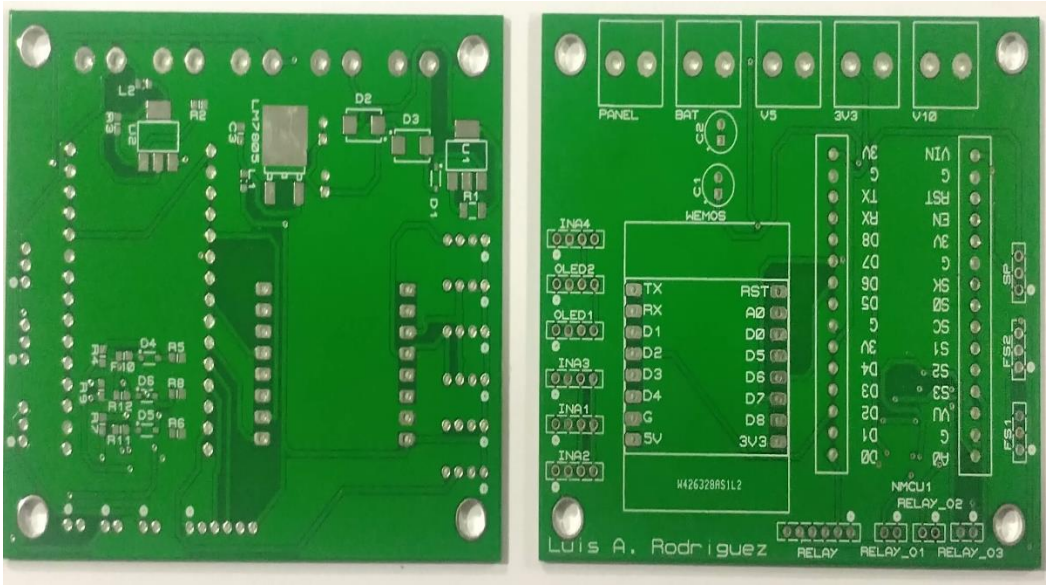


Figura 31. PCB sin componentes. Fuente propia.

En la adquisición de componentes SMD se realizó la compra vía mouser ya que ellos son uno de los grandes distribuidores de componentes electrónicos a nivel mundial. En la tabla 1 se puede apareció el listado de materiales necesarios para incorporar a la PCB.

Categoria	**Cantidad**	**Referencia**	**Valor**
Capacitores	1	C1	47U
Capacitores	1	C2	10U
Capacitores	1	C3	10000pF
Resistores	1	R1	30
Resistores	1	R2	2.10K
Resistores	1	R3	300
Resistores	3	R4,R7,R9	240
Resistores	3	R5-R6,R8	480
Resistores	3	R10-R12	0
Circuitos integrados	2	U1-U2	LM317EMP
Diodos	4	D1,D4-D6	1N4148WS-7
Diodos	2	D2-D3	STPS1L30U_1
Conectores	5	3V3,BAT,FUENTE,V5,V10	TBLOCK-I2
Conectores	1	ANALOG IN	OLED

Conectores	3	FS1-FS2,SP	26630301RP2
Conectores	1	INA 3221	INA 3221
Conectores	1	INA 219	INA 219
Conectores	1	INA 219	INA 219
Conectores	1	ADS1115	ADS1115
Conectores	2	L1-L2	MPZ1608B471A
Conectores	1	LM7805	LM7805
MCU	1	NMCU1	NODEMCU V3
Conectores	1	OLED	OLED1
Conectores	1	RELAY	26630601RP2
Conectores	1	RTC/DATALOG	WEMOS MINI 1

Tabla 1. Componentes para ensamblar el diseño de PCB. Fuente propia.

Una vez realizado el proceso de soldadura los componentes la tarjeta queda lista para realizar pruebas antes de montaje. En la figura 32 y 33 se puede observar el resultado de la soldadura y diseño final de la PCB implementada en el proyecto.

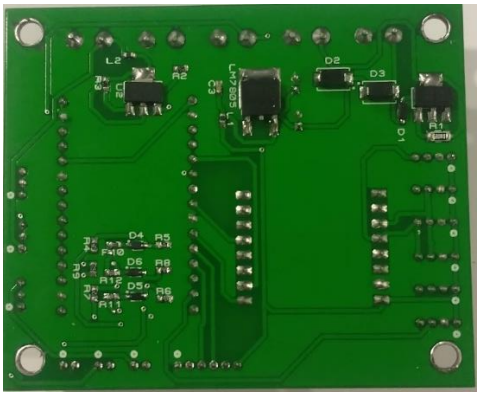


Figura 32. Lado posterior de la PCB con componentes. Fuente propia.



Figura 33. Lado frontal de la PCB con componentes. Fuente propia.

6.4.2. Conexiones y montaje en gabinete

Para esta etapa se procede a incorporar el gabinete eléctrico con los elementos adicionales para realzar el montaje. En la figura 34 se puede observar el acople de los módulos adicionales con la tarjeta de adquisición de datos, dejando este en el centro de gabinete y los módulos repartidos en el resto de área del gabinete.



Figura 34. Ensambles de circuito y gabinete. Fuente propia.

Una vez acoplado el sistema electrónico se procede a agregar el sistema de las celdas generadoras y de combustible. Teniendo todas las medidas de seguridad pertinentes, como se puede apreciar en la imagen 35 en el espacio disponible del gabinete se acondicionó con un tapete antiestático para aislar el piso de las celdas, a mano derecha se puede apreciar la celda separadora de gases y a la izquierda la celda de gas mezclado. Adicionalmente al fondo se puede apreciar la conexión electrónica.

En la figura 36 se puede apreciar el gabinete en su parte exterior en el cual se disponen de los tanques en sus extremos izquierdo y derecho en, en la parte superior se puede apreciar el montaje de tanques purificadores y la celda de combustible. Finalmente, la figura 37 expone un poco mejor el montaje explicado anteriormente.

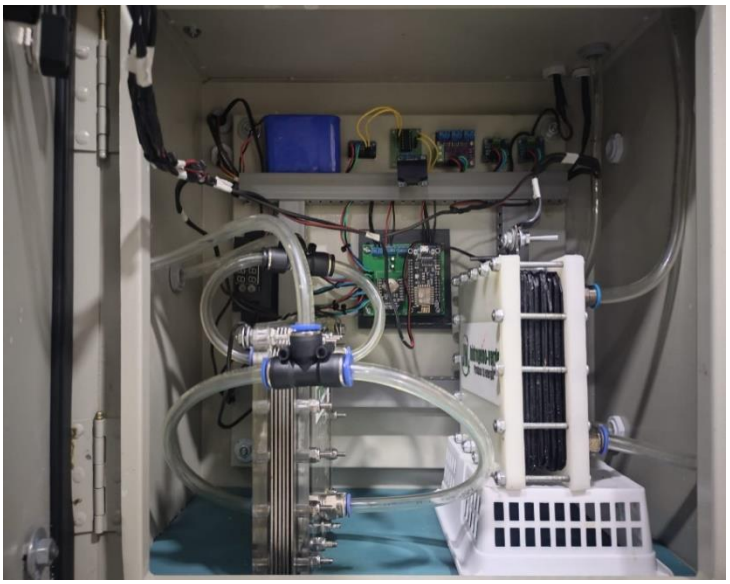


Figura 35. Montaje completo, parte interna del gabinete. Fuente propia.



Figura 36. Montaje completo, parte externa del gabinete. Fuente propia.

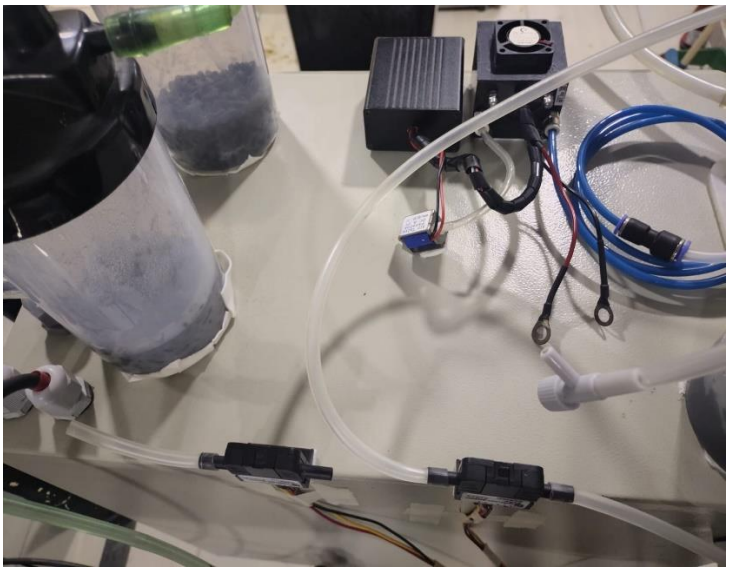


Figura 37. Montaje completo, parte externa superior del gabinete. Fuente propia

6.5. Pruebas

Para esta parte del proyecto las pruebas se dividieron de la siguiente forma:

- Pruebas en panel solar con circuito abierto
- Pruebas celda HHO con diferentes porcentajes de electrolito.
- Pruebas celda HH-OO con diferentes porcentajes de electrolito.
- Pruebas celda de combustible con el sistema solar activo

6.5.1. Pruebas panel solar Circuito abierto

La primera prueba consiste en estudiar el comportamiento del panel solar para determinar el mejor horario en el cual se genera y se mantiene la mayor cantidad de voltaje. Esto permitirá que cuando el sistema esté completo se realicen las pruebas con el panel solar en dicho horario.

Esta prueba estuvo dividida en dos partes, la primera fue el diseño y montaje en protoboard esto con el fin de descartar problemas para el ensamble final y la segunda con el funcionamiento en PCB. Como se puede apreciar en la figura 38 se adecuó un área donde estuviera el circuito y poder tomar los datos.



Figura 38. Montaje Panel solar circuito abierto. Fuente propia

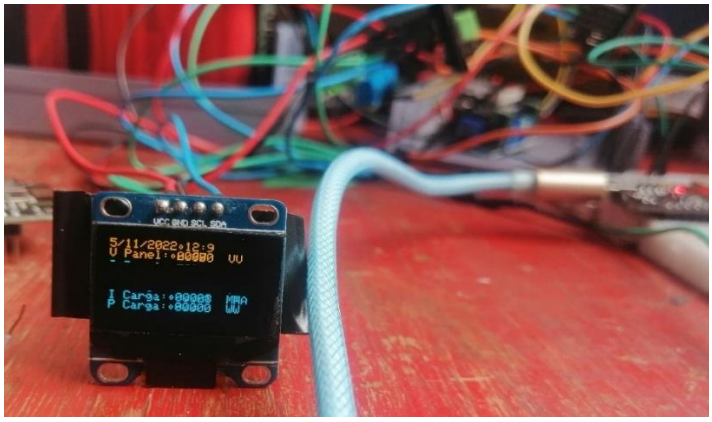


Figura 39. Pruebas iniciales con panel solar en protobard. Fuente propia

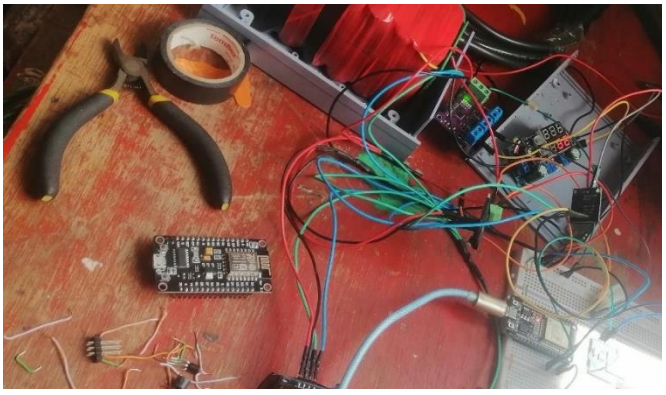


Figura 40. Montajes iniciales con pruebas en circuito abierto. Fuente propia

Una vez verificado que el sistema funciona se procede a revisar que los datos estén llegando a la web en este caso el canal de Thingspeak. Como se pueden observar en las gráficas cada una corresponde a un día en el que se estuvo observando el comportamiento del panel teniendo como resultado solo para ese día desde inicios de las 6 am (grafica 41), las primeras generaciones de energía, las escalas de voltajes ascienden desde las 7 am hasta las 12 pm (grafica 42), que es cuando el panel tiene voltajes superiores a los 20 v y luego tiene una estabilidad desde ese horario hasta casi las 4.20 pm que es cuando empieza a descender el voltaje (grafica 43).

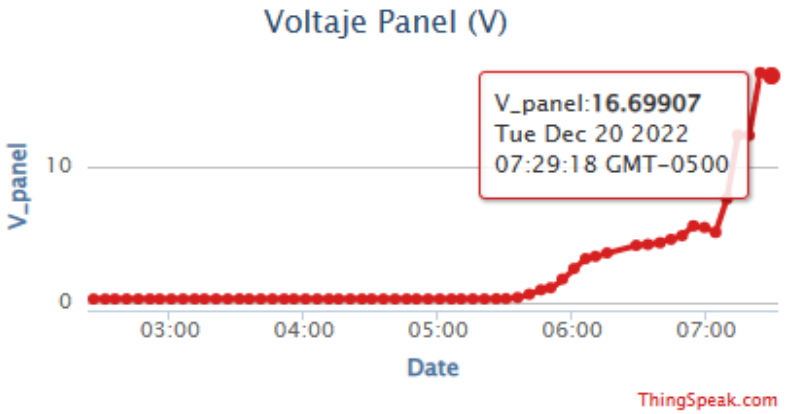


Figura 41. Voltaje del panel en amanecer. Fuente propia

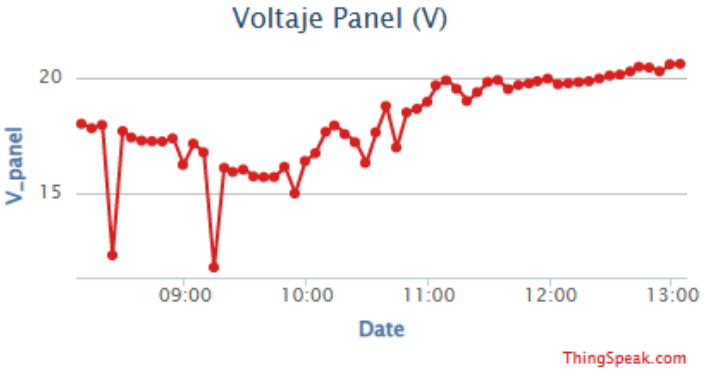


Figura 42. Voltaje del panel en el día. Fuente propia

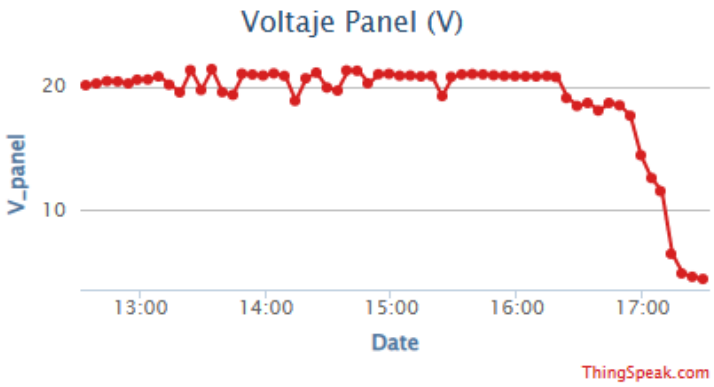


Figura 43. Voltaje del Panel Atardecer. Fuente propia

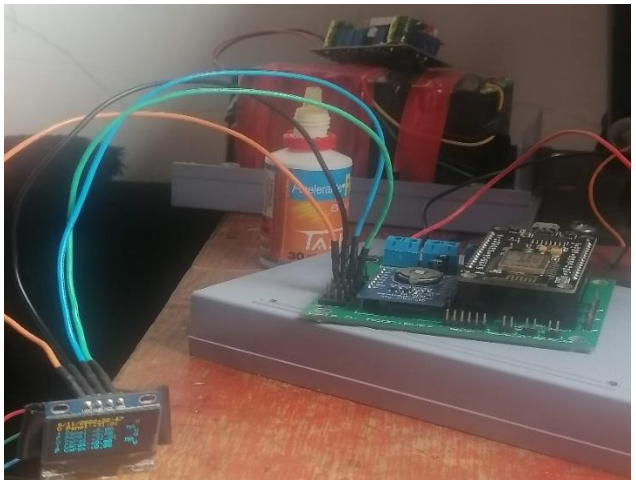


Figura 44. Pruebas iniciales del panel con PCB. Fuente propia

En la gráfica 45 se puede observar el comportamiento del panel solar en un promedio general de 24 horas. Estos datos son la gráfica de los todos los datos recolectados entre el 6 de noviembre del 2022 y el 28 de diciembre del 2022. Tiempo en el cual se estaba tomando el dato del panel solar cada 5 minutos obteniendo un total de 13500 registros del dataset generado por thingspeak en un mes de estudios para el panel solar en circuito abierto. Como se puede observar en la gráfica desde las 12:30 hasta las 16:30 es horario adecuado para poder obtener la mayor generación de voltaje del panel solar.

Adicionalmente se pueden observar algunos errores de lecturas que se generaron por eventos ya sea climáticos, o eléctricos lo cual no permitió que los datos llegaran bien a la plataforma.

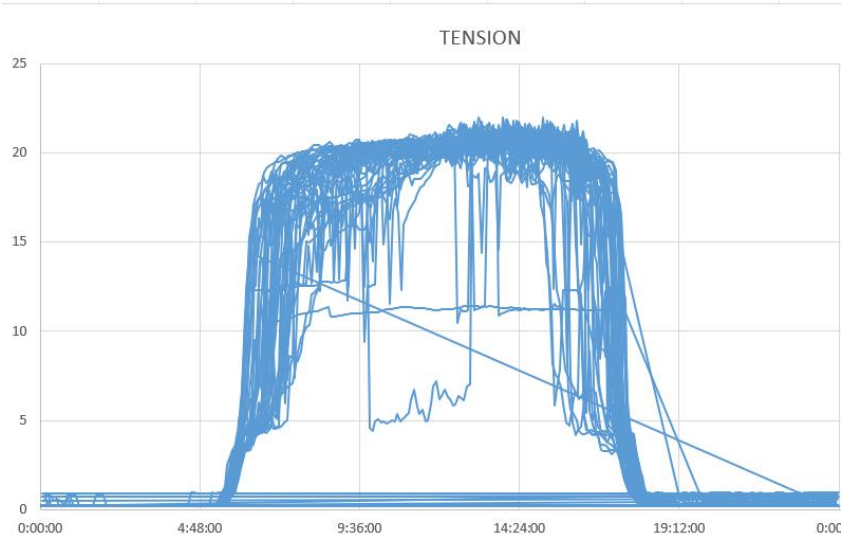


Figura 45. Grafica promedio de los datos recaudado. Fuente propia

6.5.2. Pruebas con Celda HHO

En este proceso, las pruebas realizadas a la celda generadora de HHO se parametrizaron de la siguiente manera:

- Se utilizó una fuente reguladora de voltaje configurada a una salida de 12 V para alimentar la celda.
- Se realizaron pruebas con diferentes porcentajes de electrolito, aprovechando que, al ser una celda húmeda, este depende de la mezcla de agua desmineralizada e hidróxido de sodio (NaOH), comúnmente conocido como soda cáustica.
- Las diferentes configuraciones de concentración de hidróxido de sodio para las pruebas fueron del 5%, 10%, 15% y 20% en relación a la cantidad total de agua requerida para cada prueba, que en todos los casos fue de 500 ml.
- Se utilizó un sensor INA3221 para el monitoreo del consumo de voltaje y corriente de la celda.
- Adicionalmente, se empleó el sensor de flujo F1012 para monitorear el flujo de gas producido en cada prueba.

En la figura 46 se puede apreciar el montaje de las celdas generadoras y los sensores funcionando correctamente.

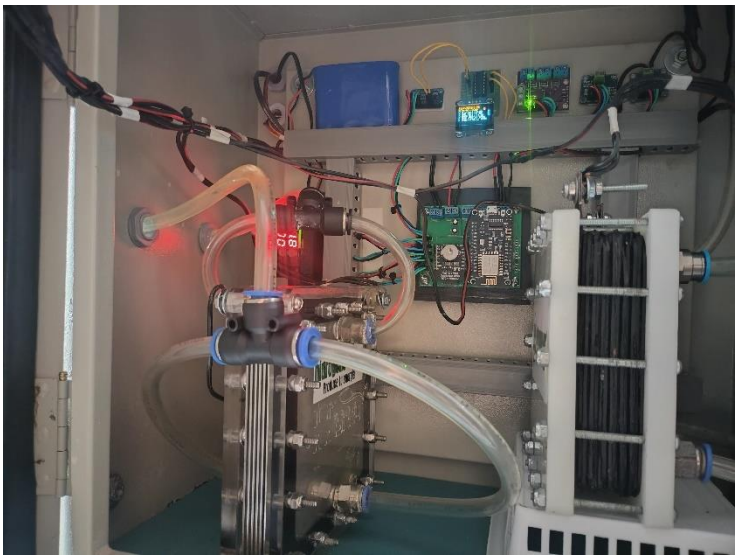


Figura 46. Montaje celdas en funcionamiento. Fuente Propia

Pruebas con electrolito al 5%

Para el porcentaje del electrolito al 5% se tiene que la generación de gas es bastante pobre como se puede apreciar en la figura 47. El flujo HHO oscila entre un promedio de 7 SCCM ya que dicha mezcla no generaba lo suficiente para hacer una electrolisis adecuada. Adicionalmente Como se puede apreciar en la figura 48 la corriente tiende a estabilizarse en un valor fijo de consumo de 0.6 A, este dato es importante porque para las próximas variaciones de electrolito como se verá en el documento dicha corriente es constante y a medida que la celda está operando el voltaje vario un poco tendiendo a disminuir como se puede apreciar en la figura 49. La tabla 2 enseña algunos de los datos obtenidos lo cual es bastante coherente con lo mencionado anteriormente.

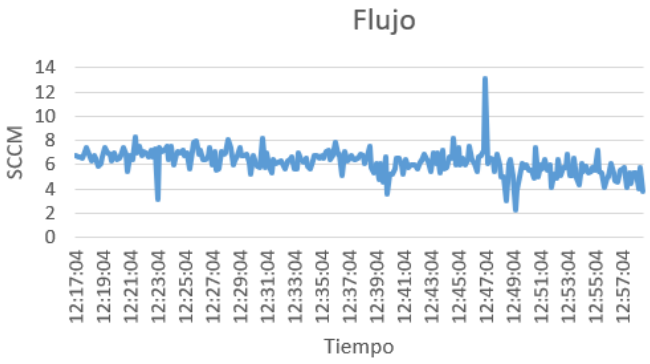


Figura 47. Flujo de gas a 5% de electrolito. Fuente propia

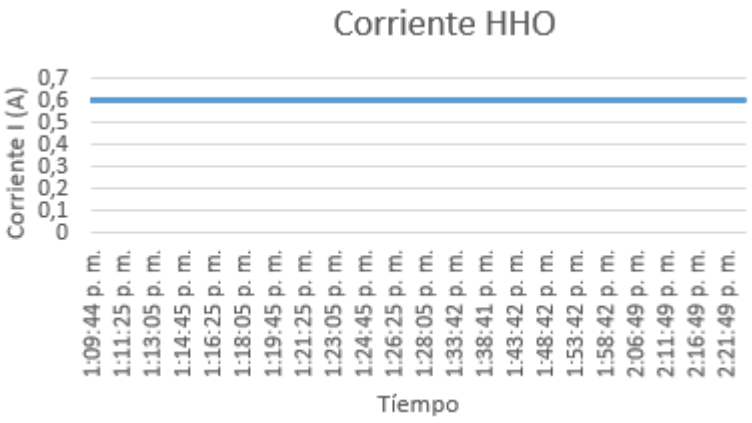


Figura 48. Corriente en Celda HHO a 5% de electrolito. Fuente propia

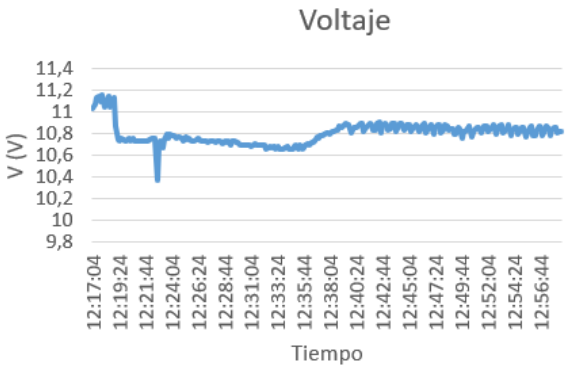


Figura 49. Voltaje en Celda HHO a 5% de electrolito. Fuente propia

V HHO (v)	I HHO (A)	P HHO (W)	F HHO (SCCM)
10,76	0,6	6,456	6,91
10,77	0,6	6,462	7,09
10,77	0,6	6,462	6,98
10,76	0,6	6,456	7,23
10,74	0,6	6,444	6,76
10,77	0,6	6,462	7,01
10,75	0,6	6,45	5,61
10,76	0,6	6,456	7,03
10,74	0,6	6,444	7,88
10,74	0,6	6,444	7,96
10,74	0,6	6,444	6,83
10,75	0,6	6,45	7,16

10,76	0,6	6,456	6,41
10,74	0,6	6,444	6,41
10,74	0,6	6,444	6,62
10,73	0,6	6,438	7,36
10,74	0,6	6,444	5,95
10,72	0,6	6,432	7,04
10,74	0,6	6,444	5,53
10,74	0,6	6,444	5,64
10,73	0,6	6,438	7,12

Tabla 2. Datos de las variables de la celda HHO al 5% de concentración de NaOH.

Pruebas con electrolito al 10%

Para la concentración del 10% de electrolito se puede observar que al medir la generación de gas tenemos un flujo bastante fructuoso como podemos observar en la figura 50. El flujo de HHO oscila entre los 10 SCCM, pero también podemos tener grandes cantidades que superan los 40 SCCM, por consiguiente, podemos intuir que las variaciones en la medida son causa de la sensibilidad del sensor lo cual puede afectar al momento de recolectar los datos. Adicionalmente Como se puede apreciar en la tabla 3 donde se muestran algunos datos tomados del dataset, la corriente tiende a estabilizarse en un valor fijo de consumo de 0.6 A, este dato nos ayuda a observar que la corriente se logra mantener estable, como sucede con el voltaje y la potencia ya que su variación es mínima.

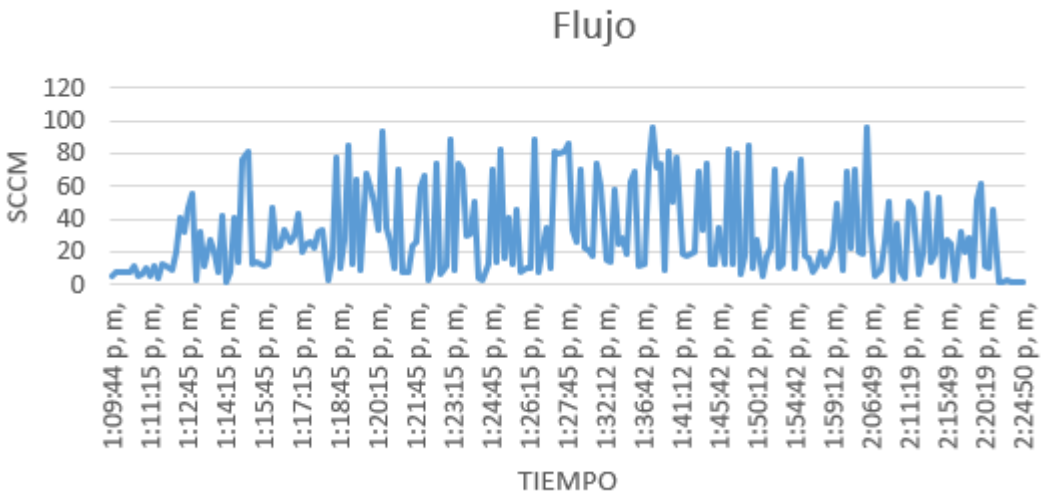


Figura 50. Flujo de gas a 10% de electrolito. Fuente propia.

V HHO	I HHO	P HHO	F HHO (SCCM)
10	0,6	6	5,46
10,01	0,6	6,006	7,74
10,02	0,6	6,012	7,54
10,02	0,6	6,012	7,54
10,02	0,6	6,012	7,96
10,04	0,6	6,024	11,21
10,04	0,6	6,024	4,72
10,02	0,6	6,012	5,92
10,05	0,6	6,03	9,68
10,04	0,6	6,024	5,08
10,06	0,6	6,036	11,54
10,08	0,6	6,048	3,87
10,08	0,6	6,048	12,12
10,09	0,6	6,054	11,84
10,09	0,6	6,054	8,45
10,1	0,6	6,06	20,03
10,1	0,6	6,06	40,83
10,1	0,6	6,06	31,65
10,12	0,6	6,072	46,85

10,14	0,6	6,084	56,01
10,12	0,6	6,072	3,01
10,15	0,6	6,09	31,62
10,17	0,6	6,102	10,99
10,18	0,6	6,108	26,84
10,19	0,6	6,114	19,64
10,21	0,6	6,126	7,61
10,22	0,6	6,132	42,11
10,22	0,6	6,132	2,05
10,23	0,6	6,138	8,27
10,24	0,6	6,144	41,31

Tabla 3. Datos de las variables de la celda HHO al 10% de concentración de NaOH. Fuente propia.

Pruebas con electrolito al 15%

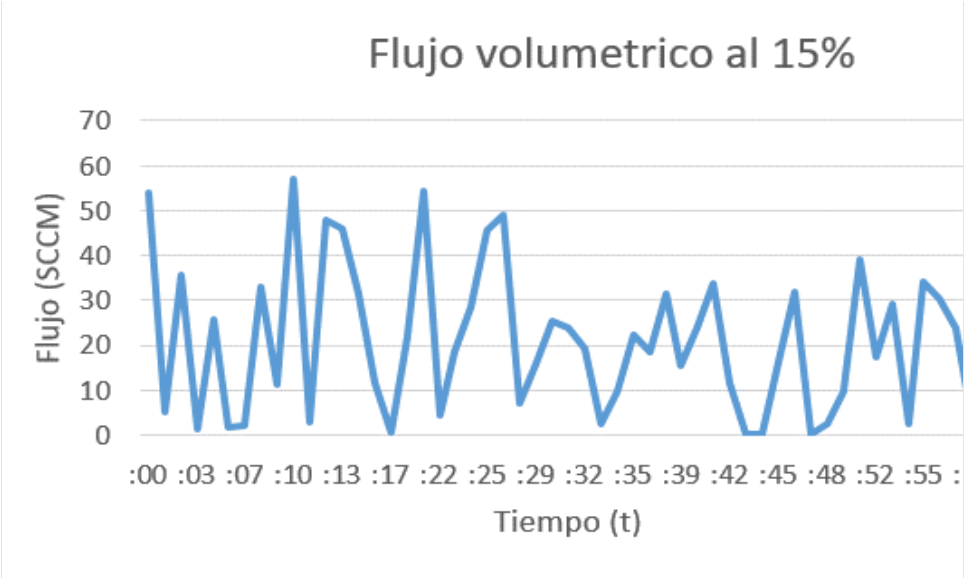


Figura 51. Flujo de gas a 15% de electrolito. Fuente propia.

V HHO	I HHO	P HHO	F HHO (SCCM)
8,86	0,6	5,3160	42.11

9,27	0,59	5,4693	0.3
8,92	0,6	5,3520	43.01
9,3	0,6	5,5800	29.789
9,28	0,6	5,5680	0.41
8,82	0,6	5,2920	21.187
9,27	0,6	5,5620	2.76
9,27	0,6	5,5620	16.29
9,26	0,6	5,5560	4.32
9,39	0,6	5,6340	0.96
9,39	0,59	5,5401	0.2
9,33	0,6	5,5980	28.383
9,32	0,6	5,5920	66.98
9,14	0,6	5,4840	15.56
9,04	0,6	5,4240	21.5
9,27	0,6	5,5620	59.8
9,07	0,6	5,4420	3.5
9,24	0,6	5,5440	27.153
9,18	0,6	5,5080	3.61
9,39	0,6	5,6340	43.47
9,28	0,6	5,5680	4.35
8,99	0,6	5,3940	4.17
9,36	0,59	5,5224	63.54
9,19	0,6	5,5140	10.31
8,83	0,6	5,2980	12.8

Tabla 4. Datos de los sensores de la celda HHO al 15% de concentración de NaOH. Fuente propia.

Pruebas con electrolito al 20%

Tomando las conclusiones de las anteriores pruebas podemos observar que hay posibles fluctuaciones al momento del sensor medir (Tabla 5), la corriente sigue oscilando por los 0.6 A, sin embargo, se observan lecturas más bajas de 0.21, la potencia si tiende a disminuir un poco al igual que el voltaje.

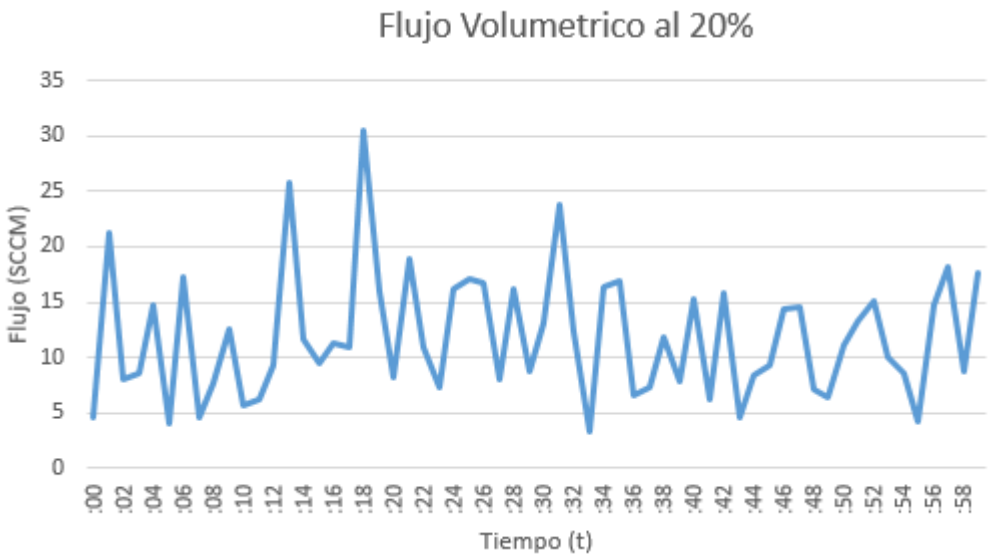


Figura 52. Flujo de gas a 20% de electrolito. Fuente propia

V HHO (v)	I HHO (A)	P HHO (W)	F HHO (SCCM)
9,03	0,6	5,418	4.49
9,27	0,6	5,562	15.6
9,24	0,6	5,544	11.95
9,36	0,6	5,616	0.6
9,31	0,6	5,586	6.33
9,37	0,6	5,622	25.92
9,16	0,6	5,496	0.14
9,38	0,6	5,628	2.35
9,12	0,6	5,472	15.7
9,19	0,6	5,514	15.8
9,28	0,6	5,568	9.16
9,32	0,6	5,592	5.34
8,73	0,21	1,8333	18.66
8,65	0,21	1,8165	15.9
9,11	0,6	5,466	0.26
9,27	0,6	5,562	0.14
9,18	0,6	5,508	15.1

9,33	0,6	5,598	0.13
8,92	0,6	5,352	15.2
9,11	0,6	5,466	1.37
8,83	0,6	5,298	5.33
9,33	0,6	5,598	15.8
9,19	0,6	5,514	2.39
8,76	0,21	1,8396	6.1
9,54	0,6	5,724	9.77

Tabla 5. Datos de los sensores de la celda HHO al 20%. Fuente propia.

6.5.3. Pruebas con celda HH-OO

Las pruebas correspondientes a la celda de HH-OO se Realizaron bajo esquemas similares de obtención usados en la primera celda. Teniendo como parámetros principales lo siguiente para este proceso:

- Se utilizó una fuente reguladora de voltaje configurada a una salida de 12 V-14 V para alimentar la celda.
- Se realizaron pruebas con diferentes porcentajes de electrolito, aprovechando que, al ser una celda húmeda, este depende de la mezcla de agua desmineralizada e hidróxido de sodio (NaOH), comúnmente conocido como soda cáustica.
- Las diferentes configuraciones de concentración de hidróxido de sodio para las pruebas fueron del 10%, 15% y 20% en relación a la cantidad total de agua requerida para cada prueba, que en todos los casos fue de 2000 ml.
- Se utilizó un sensor INA3221 para el monitoreo del consumo de voltaje y corriente de la celda.
- Adicionalmente, se empleó el sensor de flujo F1012 para monitorear el flujo de gas producido en cada prueba.

Pruebas con electrolito al 10%, Fuente de alimentación 12V

Inicialmente para suplir el 10% de peso para 2000 ml se emplearon 200 gramos de NaOh de electrolito, el proceso para mezclar esto es bastante peligroso hay que manipular con cuidado el químico, evitar inhalaciones de vapores tóxicos y sobre todo tener ventilada toda el área. En el caso de estas pruebas se pudo presenciar que primero se requiere más agua para poder usar bien la celda ya que los tanques son demasiado grandes eso implica un mayor consumo de recursos para poder hacer bien una producción y adicionalmente a esto proteger la celda ya que al no estar completamente llena de agua puede ocasionar averías en sus membranas y esto conlleva a una

mezcla de gases que es lo que no se quiere. se pudo apreciar que la producción de hidrógeno es mucho más lenta en comparación con las celdas de HHO.

En las figuras 53, 54 y 55 se puede apreciar la tendencia del comportamiento del voltaje (graficas 53 y 54 son la comparación del grafico local contra el grafico obtenido en thingspeak) y corriente con al 10% de concentración de NaOH, como se puede observar el voltaje de alimentación era de 12v pero en promedio estuvo trabajando por debajo sobre los 11V, en el caso de la corriente fue variable en el tiempo teniendo un consumo de 0.65 a 1 A.

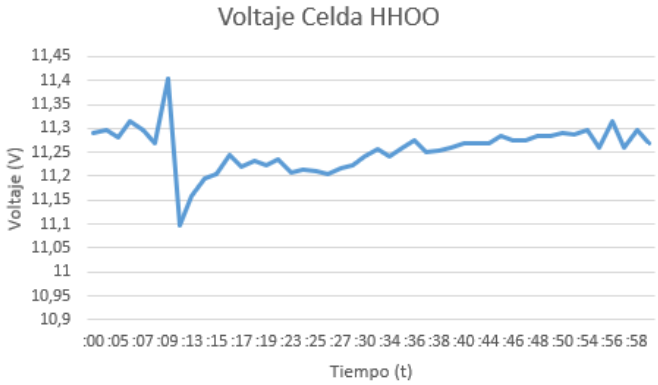


Figura 53. Comportamiento del voltaje, Celda separadora a 10% del electrolito. Fuente propia.

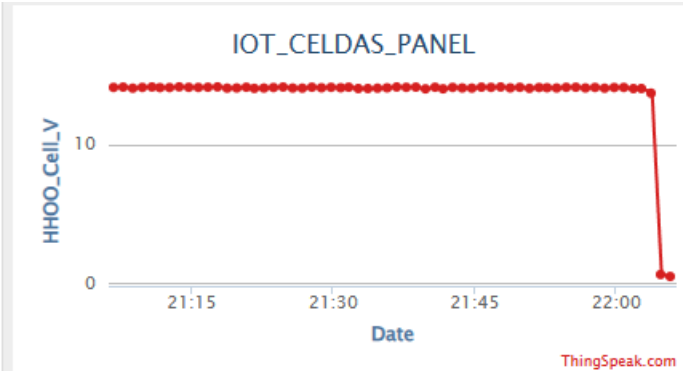


Figura 54. Comportamiento de voltaje, celda separadora desde Thingspeak. Fuente propia.

En las figuras 55 y 56 se aprecian los comportamientos del flujo tanto de oxígeno como de hidrogeno, el hidrógeno tiende a tener un promedio de flujo de 8-10 SCCM mientras que el oxígeno estuvo por debajo de 5 SCCM. Adicionalmente se pueden apreciar unos picos altos en las lecturas de ambos elementos lo cual indica lecturas de error en el proceso. Finalmente, la gráfica 57 representa el flujo de producción de hidrogeno contra la producción de oxígeno. A partir de ahora la producción de oxígeno será despreciada pues no será necesaria para la parte final que es el acople con la celda de combustible.

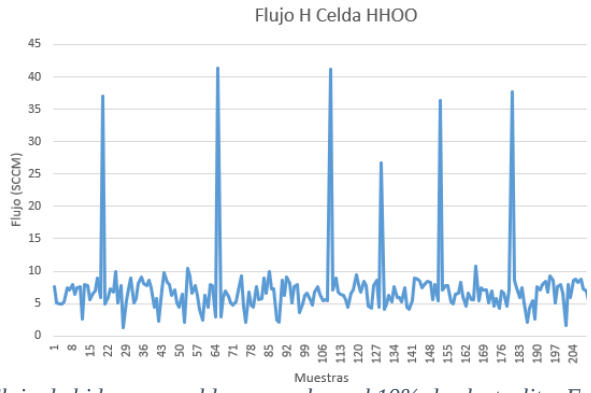


Figura 55. Flujo de hidrogeno celda separadora al 10% de electrolito. Fuente propia.

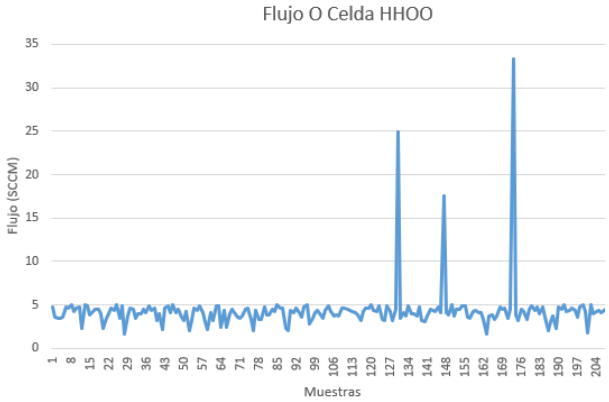


Figura 56. Flujo de Oxígeno en la celda separadora a 10% de electrolito

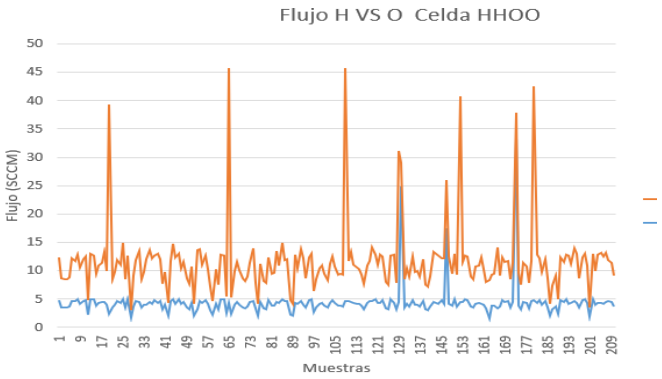


Figura 57. Flujo de Hidrogeno (naranja) contra flujo de oxígeno (azul). Fuente propia.

Para finalizar en la tabla 6, se pueden apreciar algunos datos obtenidos de la data set, de la cual se obtuvieron las gráficas que se presentaron en esta sección.

V HHO	I HHOO	P HHOO	F HH (SCCM)	F OO (SCCM)

12	0,65	7,8	7,6036	4,8018
11,01	0,65	7,1565	5,1084	3,5542
11,02	0,65	7,163	4,9764	3,4882
11,02	0,65	7,163	4,9764	3,4882
11,02	0,65	7,163	5,2536	3,6268
11,04	0,65	7,176	7,3986	4,6993
11,04	0,65	7,176	7,1152	4,5576
11,02	0,65	7,163	7,9072	4,9536
11,05	0,72	7,956	6,3888	4,1944
11,04	0,75	8,28	7,3528	4,6764
11,06	0,75	8,295	7,6164	4,8082
11,08	0,75	8,31	2,5542	2,2771
11,08	0,75	8,31	7,9992	4,9996
11,09	0,75	8,3175	7,8144	4,9072
11,09	0,75	8,3175	5,577	3,7885
11,1	0,78	8,658	6,577	4,2885
11,1	0,65	7,215	6,9478	4,4739
11,1	0,83	9,213	8,889	4,4445
11,12	1,00	11,12	5,921	3,9605
11,14	0,75	8,355	36,9666	2,35
11,12	1,00	11,12	4,9866	3,4933

Tabla 6. Datos de los sensores de la celda HHOO al 10%. Fuente propia.

Pruebas con electrolito al 15%, Fuente de alimentación 12V

Para el caso de la concentración de electrolito al 15% de la cantidad total de agua desmineralizada se tiene que el flujo aumenta un poco respecto a la concentración del 10% pero es muy similar ya que este oscila entre los 8 hasta 13 SCCM lo cual es una medida bastante baja aun ya que para poder alimentar la celda de combustible es necesario tener un flujo que permita la circulación de 119.6 ml/min como mínimo y este flujo nos da apenas: 13/ml lo cual nos conlleva a buscar otra

solución para poder producir un poco más de hidrogeno que es lo que se requiere para activar la celda de combustible.
Las figuras 59, 60 y 61 son la representación gráfica de un segmento de muestras que se realizaron esas pruebas donde se puede observar el comportamiento del flujo en ambos sensores.

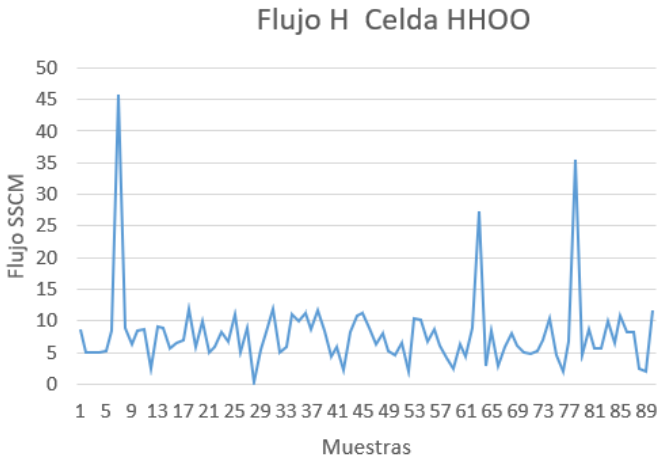


Figura 58. Flujo de Hidrogeno en la celda separadora a 15% de electrolito. Fuente propia.

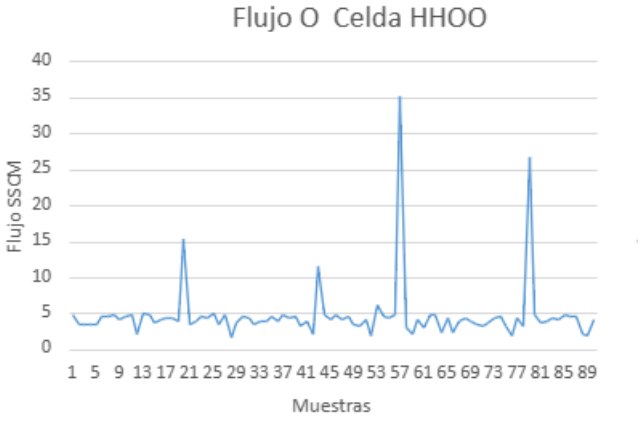


Figura 59. Flujo de Oxígeno en la celda separadora a 15% de electrolito. Fuente propia.

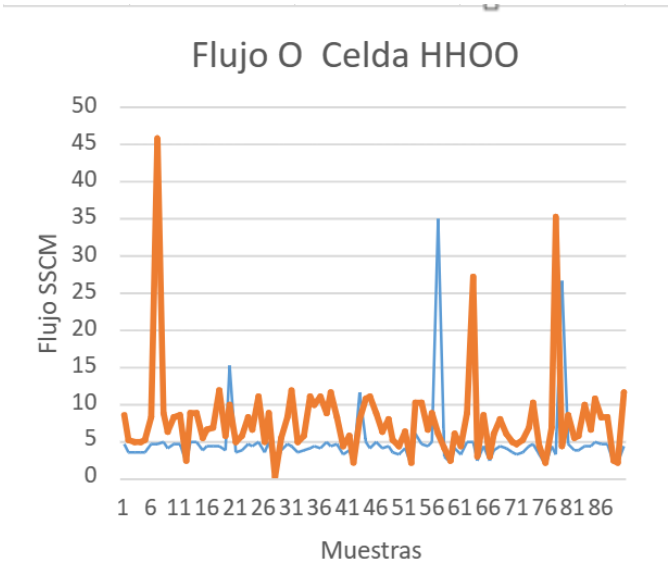


Figura 60. Flujo de Hidrogeno (azul) contra flujo de oxígeno (naranja). Fuente propia.

Para finalizar en la tabla 7, se pueden apreciar algunos datos obtenidos de la data set, de la cual se obtuvieron las gráficas que se presentaron en esta sección.

V HHOO	I HHO	P HHOO	F HH (SCCM)	F OO (SCCM)
11,86	0,8	9,488	8,6036	4,8018
12,27	0,67	8,2209	5,1084	3,5542
11,92	0,75	8,94	4,9764	3,4882
12,3	0,75	9,225	4,9764	3,4882
12,28	0,81	9,9468	5,2536	3,6268
11,82	0,85	10,047	8,3986	4,6993
12,27	0,67	8,2209	45,875	4,5576
12,27	0,85	10,4295	8,9072	4,9536
12,26	0,85	10,421	6,3888	4,1944
12,39	0,91	11,2749	8,3528	4,6764
12,39	0,69	8,5491	8,6164	4,8082
12,33	0,69	8,5077	2,5542	2,2771
12,32	0,7	8,624	8,9992	4,9996
12,14	0,7615	9,24507692	8,8144	4,9072
12,04	0,7605	9,15701538	5,577	3,7885
12,27	0,7596	9,31980659	6,577	4,2885

12,07	0,7586	9,15595714	6,9478	4,4739
12,24	0,7576	9,27280879	11,889	4,4445
12,18	0,7566	9,21530769	5,921	3,9605
12,39	0,7556	9,36193846	9,9666	15,2547
12,28	0,7546	9,26667692	4,9866	3,4933

Tabla 7. Datos de los sensores de la celda HHOO al 10%. Fuente propia.

Pruebas con electrolito al 20%

Para esta prueba se establecieron algunos cambios para tratar de mejorar la producción de hidrogeno, dando como parámetros para las pruebas las siguientes:
La fuente de alimentación cambia de 12V a 14.5 V; Se aumentó el voltaje con el fin de aumentar la corriente que circula por la celda y así obtener una mayor producción ya que como se puede evidenciar en las anteriores pruebas con las celdas, las corrientes no varían según la cantidad de electrolito que se le agregue por ende en esta prueba es imperante determinar una mejor forma de adquirir más hidrogeno.
El electrolito será el 20% en peso de la cantidad de agua empleada. Como se mencionó en la prueba de 10% se requieren 2 litros de solución (agua desmineralizada) y para suplir esa cantidad se requieren que 400 gramos de NaOH sean mezclados y depositados en los tanques de la celda.

Como se puede apreciar en la figura 62 el flujo de hidrogeno aumenta respecto al 10% y 15%. Igualmente, este flujo trata de ser contante, pero sigue siendo un poco bajo para la demanda requerida. El flujo de oxígeno fluctúa igualmente y como se aprecia en la figura 64. Existe una lectura de casi 700 SCCM lo cual es un error de lectura ya que el sistema no genera dichas señales.

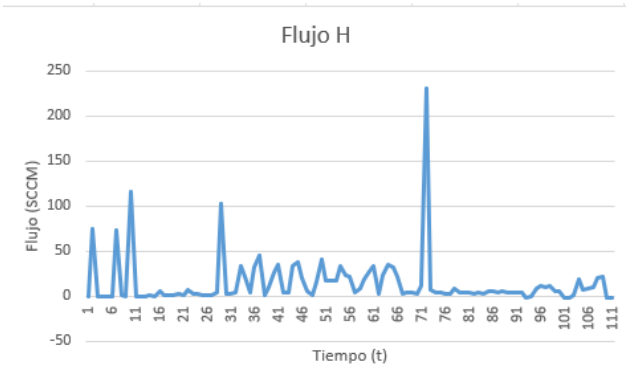


Figura 61. Flujo de Hidrogeno en la celda separadora a 20% de electrolito. Fuente propia.

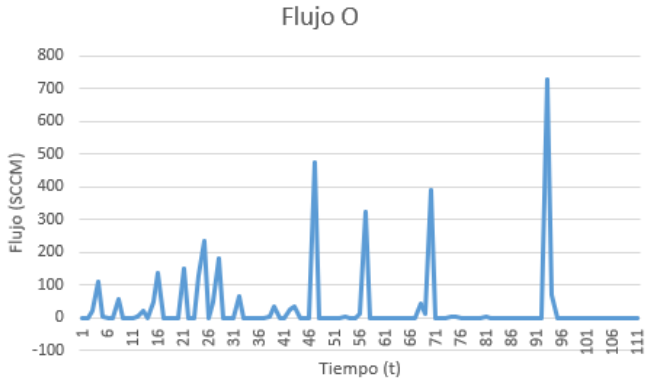


Figura 62. Flujo de Oxigeno en la celda separadora a 20% de electrolito. Fuente propia.

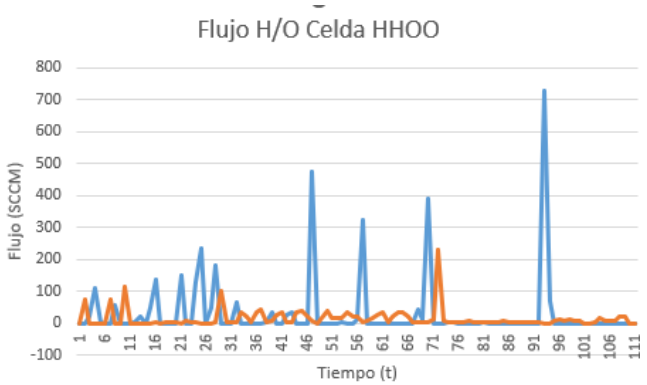


Figura 63. Flujo de Hidrogeno (Naranja) contra flujo de oxígeno (azul). Fuente propia

Finalizando la etapa de pruebas se adjunta la tabla con algunos datos registrados en la prueba de parámetros fijos realizada a la celda separadora de gases a un porcentaje de electrolito del 20%.

Voltaje HHOO:	Corriente HHOO:	Potencia HHOO:	Flujo HHOO:
14,11	0,95	13,4045	102,14
14,14	0,95	13,433	2,13
14,12	0,95	13,414	3,06
14,14	0,95	13,433	3,54
14,14	0,95	13,433	32,76
14,15	0,95	13,4425	21,28
14,14	0,95	13,433	3,84
14,15	0,95	13,4425	32,42
14,11	1	14,11	45,08
14,13	1	14,13	1,23

14,13	1	14,13	9,18
14,15	1	14,15	25,5
14,14	1	14,14	34,34
14,14	1	14,14	3,84
14,13	1	14,13	3,76
14,15	1	14,15	33,54
14,15	1	14,15	37,11
14,14	1	14,14	20,53

Tabla 8. Datos de los sensores de la celda HHOO al 20%. Fuente propia

6.5.4. Pruebas Celda de combustible

Pruebas en celda de combustible cuando el electrolito está al 15% en la celda serradora de gases

Las pruebas con la celda de combustible fueron breves esto debido a que el fabricante recomienda que para su correcto funcionamiento esta sea alimentada con un flujo min de 119.6 ml/min. Por tal motivo como se le estaba aplicando un flujo de hidrogeno menor al recomendado se evitó exponer a periodos largos para así garantizar la vida útil de este elemento.

Como se puede apreciar en la figura 62 la celda de combustible está trabajando con un voltaje promedio de 2.7 voltios y una corriente promedio de 0.5 Amperios. Esta prueba fue contundente pues se requería saber con qué cantidades mínimas podía trabajar la celda de combustible. Este voltaje generado no era suficiente ya que según la hoja del fabricante el voltaje operativo óptimo de la celda es de 6v a 1.67 A. Ya que el flujo que ingresaba a la celda era oscilante entre 10 y 30 SCCM la celda por sus propiedades químicas generaba voltaje, pero no era encomendable dejarla mucho tiempo operando para evitar daños internos.

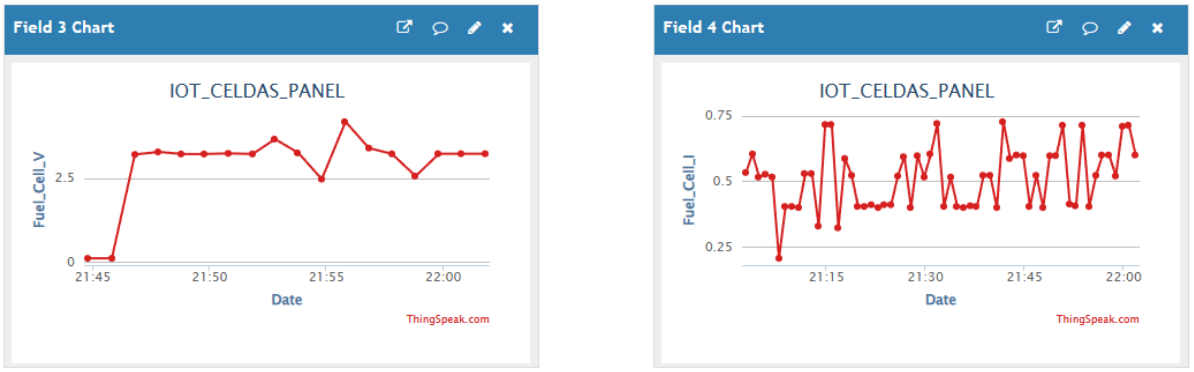


Figura 64. Voltaje y corriente Celda de combustible. al 15% de electrolito en la celda HHOO Fuente Propia

La tabla 8 muestra los registros generados en 20 minutos de monitoreo de esta celda donde se puede apreciar el voltaje de la fuente que alimenta la celda separadora es de 14.1 voltios en promedio, lo cual se puede apreciar en la figura 63.

FUEL CELL V	FUEL CEL I	HHOO CELL V	O GAS	HH GAS
0.47293	0.59733	14.13733	-2.12596	4.48969
0	0.32667	14.11253	136.52086	25.93956
3.9388	0.71333	14.16773	-2.37711	56.93541
3.28493	0.59733	14.15201	-2.47389	10.82617
3.3028	0.52667	14.14507	-2.59365	4.80324
0.22	0.70933	14.1216	-2.46459	52.56146
3.41507	0.59733	14.1528	-2.34057	1.77504
3.26053	0.52	14.1528	-2.50106	10.74699
3.2676	0.40667	14.1688	-2.59365	23.31457
3.11693	0.40667	1.23707	-2.49897	27.65202
1.84547	0.59733	0.49573	-2.37295	31.05307
1.41747	0.516	0.43973	-2.2812	10.43127
1.002	0.404	0.408	-2.18655	17.2854
0.64627	0.52267	0.384	-2.06035	1.93029
0.47173	0.4	0.368	-1.8438	21.6959

Tabla 9. Datos de los sensores de la celda HHOO al 15%. Fuente propia.

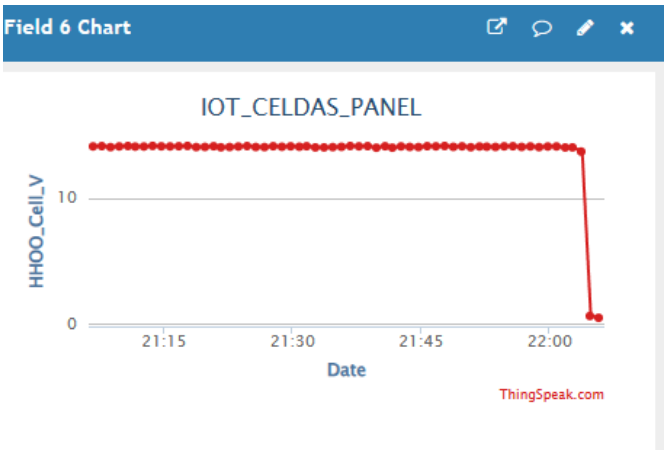


Figura 65. Voltaje Celda separadora con electrolito 15%. Fuente propia

Por último, se encuentran las gráficas de oxígeno generado (parte izquierda figura 64) e hidrogeno generado (parte derecha grafica 64) donde se puede apreciar un comportamiento en particular, ya que los tanques de oxígeno al generarse tan poco lo acumulaban por presión natural hasta que lo expulsaban de golpe por eso los picos de generación. Algo similar, pero con más frecuencias sucede en el caso del hidrogeno lo que significa que las gráficas que aparecen en la sección de las pruebas de electrolito al 10% no es un error del sensor, solo que al ser un gas retenido por agua cuando rompe la presión que esta le ejerce es que es liberado.

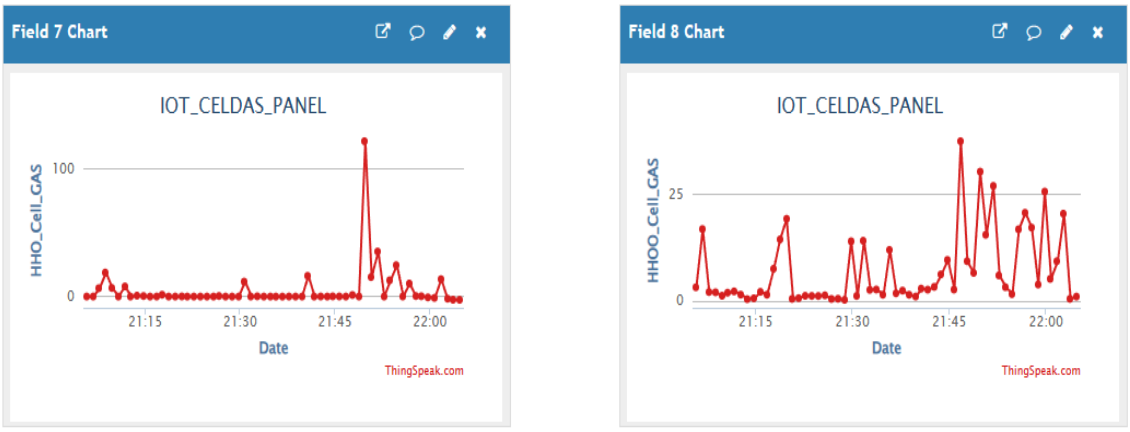


Figura 66. Flujo de Oxigeno (izquierda) e Hidrogeno (derecha) al 20% de electrolito en la celda HHOO. Fuente propia.

Pruebas en celda de combustible cuando el electrolito está al 20% en la celda separadora de gases

Teniendo en cuenta que el voltaje generado cuando el electrolito está al 15% es de 2.7 V promedio, la prueba siguiente a realizar es aprovechar el flujo de hidrogeno generado cuando el electrolito

está en una concentración del 20%. Se tiene que el voltaje promedio es de 3.7 voltios y la corriente es de 0.7 amperios. En la figura 65 se puede apreciar el comportamiento de la celda de combustible el cual tenía como entrada un flujo de hidrogeno bastante variable, oscilando entre los 10 SCCM y los 50 SCCM como se puede apreciar en la figura 66. Adicionalmente a eso se puede apreciar un pico de salida de oxígeno en la figura 67 dando razón al comportamiento del gas descrito anteriormente en que se represa hasta que supera la presión del agua y puede ser liberado permitiendo los picos altos de flujo.

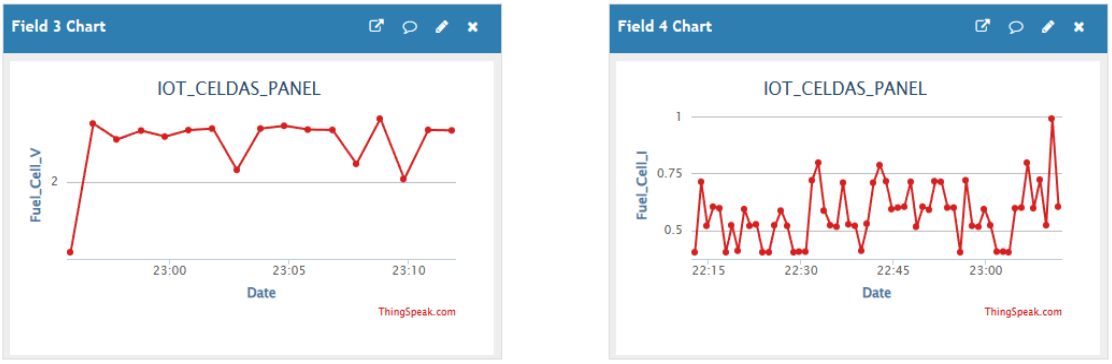


Figura 67. Voltaje y corriente Celda de combustible. al 20% de electrolito en la celda HHOO Fuente Propia.

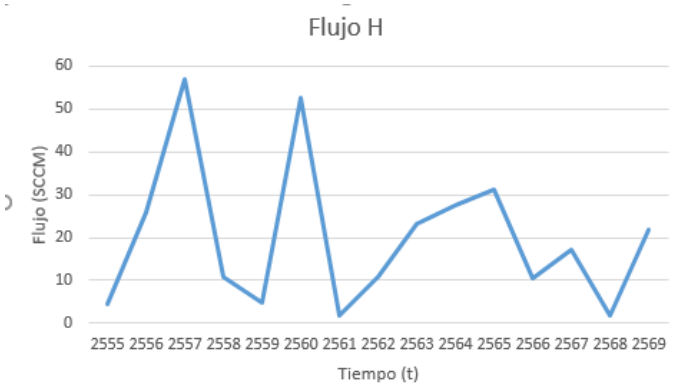


Figura 68. Flujo de hidrogeno en la Celda de combustible. al 20% de electrolito en la celda HHOO Fuente Propia.

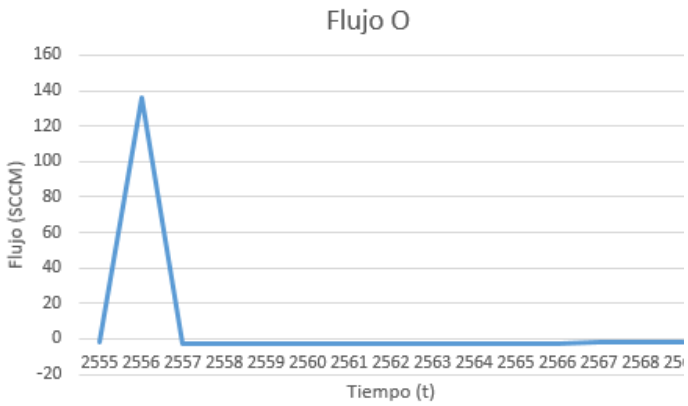


Figura 69. Flujo de Oxígeno al 20% de electrolito en la celda HHOO. Fuente Propia.

Por último, se tiene la tabla 9 que representa algunos de los datos obtenidos en dicha prueba.

FUEL CELL V	FUEL CEL I	HHOO CELL V	O GAS	HH GAS
0.26013	0.404	14.12106	-1.81247	3.69075
3.43787	0.72	14.1288	340.14148	13.01572
3.0464	0.52	14.12026	-1.3739	1.94278
3.264	0.516	14.11333	-1.8438	28.63225
3.7514	0.59333	14.136	0.15205	1.00428
4.27627	0.52267	14.1288	-1.65619	45.45102
3.31373	0.40667	14.14374	-1.7197	19.29161
2.292	0.40667	14.14427	9.9698	4.36661
3.7.31453	0.404	14.1272	-1.90732	33.9531
3.38133	0.59733	14.10454	-2.0313	17.46976
3.2884	0.6	14.11333	-2.09378	10.19266
4.28013	0.79733	14.1512	-2.05101	29.22699
2.44227	0.59733	14.1656	-1.83748	5.35426
3.55853	0.72267	14.12053	-2.62603	17.78653
2.0676	0.52267	14.11893	-2.62743	2.84174
4.28027	0.99067	14.1368	-2.56146	28.26872
3.26867	0.604	14.15947	-2.53119	16.65011
0.83267	0.516	14.16027	161.40521	3.25409
0.43173	0.52267	14.16027	28.25111	1.398

Tabla 10. Datos de los sensores de la celda HHOO al 20%. Fuente propia.

7. Resultados

Las pruebas de laboratorio realizadas exhaustivamente a lo largo de este proceso con el fin de poder parametrizar la cantidad de electrolito y voltaje en la celda separadora de gases para garantizar la mayor generación de hidrogeno y así obtener generación de voltaje a través de la celda de combustible.
Fueron realizadas con el fin de que en el momento en el que se acople el panel solar con el resto de circuitos se pueda obtener la mayor eficiencia.
Dichos parámetros permitieron saber las variables que se manejaran en la prueba final tales como:

- Determinar el horario preciso para poder usar el panel solar y así obtener la mayor estabilidad en voltaje durante el proceso.
- Determinar el voltaje adecuado de alimentación de la celda separadora de gases que cumpla con los parámetros de energía entregados por el panel solar en este caso un máximo de 60 watts, las pruebas de laboratorio en la celda separadora de gases arrojaron como resultado un consumo de 14 watts aproximadamente, cuando la fuente de alimentación es de 14 Voltios, generando un consumo de corriente oscilando entre los 0.9 a 1 Amperios
- Determinar la cantidad de electrolito indicada para poder generar el suficiente flujo de hidrogeno y así generar voltaje con la celda de combustible para la prueba final se utilizará.

En la figura 70 y 71 se puede apreciar el montaje con los acoples finales en los cuales en el fondo al lado de la ventana se aprecia el panel solar, en el centro de la imagen se encuentra el gabinete con las celdas (HHO, HH-OO, Combustible) cada una con sus respectivos tanques. Tanque de la izquierda color amarillo es el tanque de la celda HHO, tanque doble negro parte derecha es el de la celda separadora de gases.



Figura 70. Montaje Final Sistema de generación de voltaje a través de hidrogeno verde. Fuente propia.



Figura 71. Panel solar sobre el medio día. Fuente propia.

En la figura 72 se puede apreciar el comportamiento del panel solar antes de activar la celda separadora de gases, teniendo como voltaje en circuito abierto 20.6 voltios y una corriente de entre 25 y 30 mili Amperio.

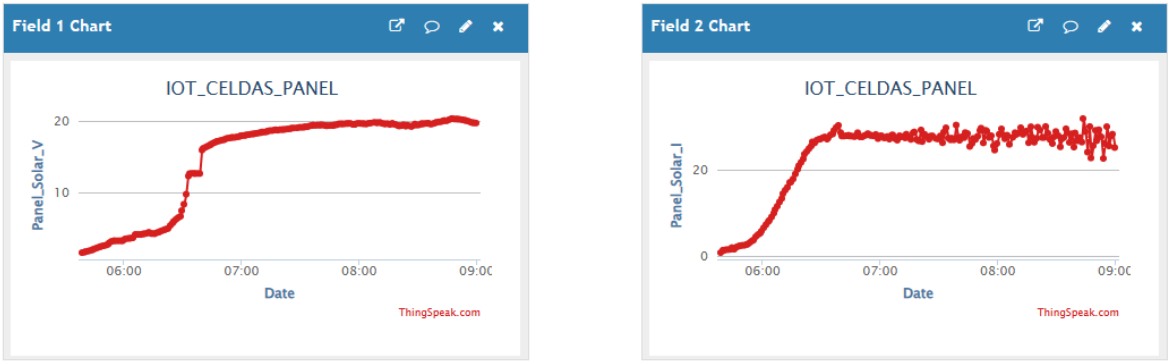


Figura 72.Comportamiento panel solar entes de activar la celda separadora. Fuente propia.

La figura 73 muestra la caída de voltaje generada al activar la celda separadora de gases cuando la radiación solar no es suficiente. El voltaje cae hasta casi 4 voltios y el consumo de corriente aumenta a 150 mili amperios.

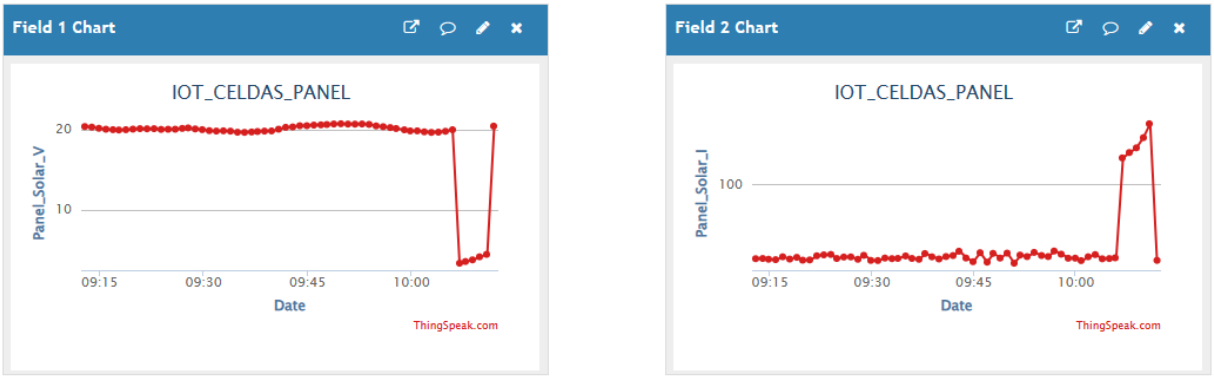


Figura 73. Comportamiento panel solar activando celda separadora de gases cuando radiación solar es insuficiente. Fuente propia.

En la figura 74 se aprecia el consumo de la celda separadora de gases vs el voltaje generado por el panel. Como se puede apreciar se ve la caída del voltaje en el panel solar descendiendo a un promedio de 8.5 voltios que es el voltaje que consume en su momento la celda separadora.

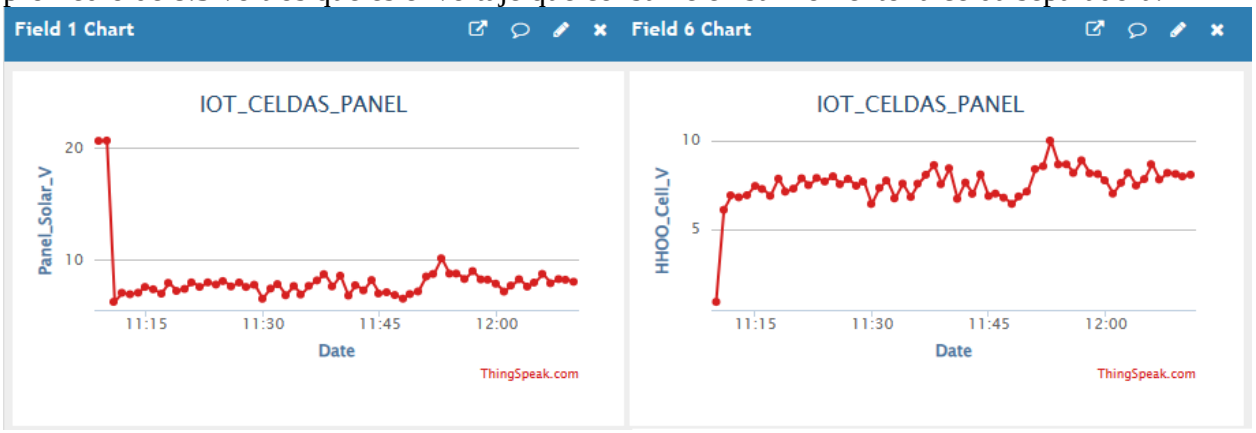


Figura 74. Comportamiento de voltaje en panel solar contra la celda separadora. Fuente Propia.

Como se evidencia el voltaje promedio del panel solar fue de 8.5 V con una corriente de 295 mA. El voltaje de consumo de la celda separadora de gases fue de 8.5 V con una corriente de 0.37 A. El flujo de hidrogeno en esta etapa fue de 8 SCCM en promedio como se puede apreciar en la figura 75. En la figura 76 se puede apreciar los tanques sin movimientos de gas.

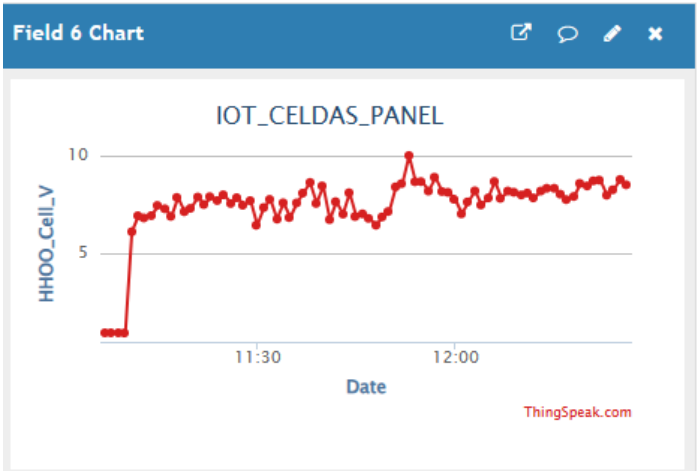


Figura 75. Flujo de hidrogeno generado con alimentación de panel solar. Fuente propia.



Figura 76. Tanques indicadores de flujo gaseoso sin actividad. Fuente propia.

El flujo de hidrogeno generado en la prueba con el panel solar no fue lo sufrientemente fuerte para poder lograr alimentar la celda de combustible. Este flujo el cual tuvo un promedio de 8 SCCM, se requiere mucho más para poder hacer funcionar correctamente la celda de combustible.

Se estuvo monitoreando las variables a través de thingspeak. En la figura 77 se evidencia el promedio de los comportamientos de voltajes de la celda generadora, y el panel solar en un trascurso de 4 horas aproximadamente. Con estas graficas se puede concluir que los datos promedio obtenidos en la prueba son satisfactorios pues ayudan a identificar las falencias que tiene el sistema en cuanto a demanda energética, las cuales se pueden corregir para mejorar la generación de hidrogeno y así poder llevar a cabo una producción estable.

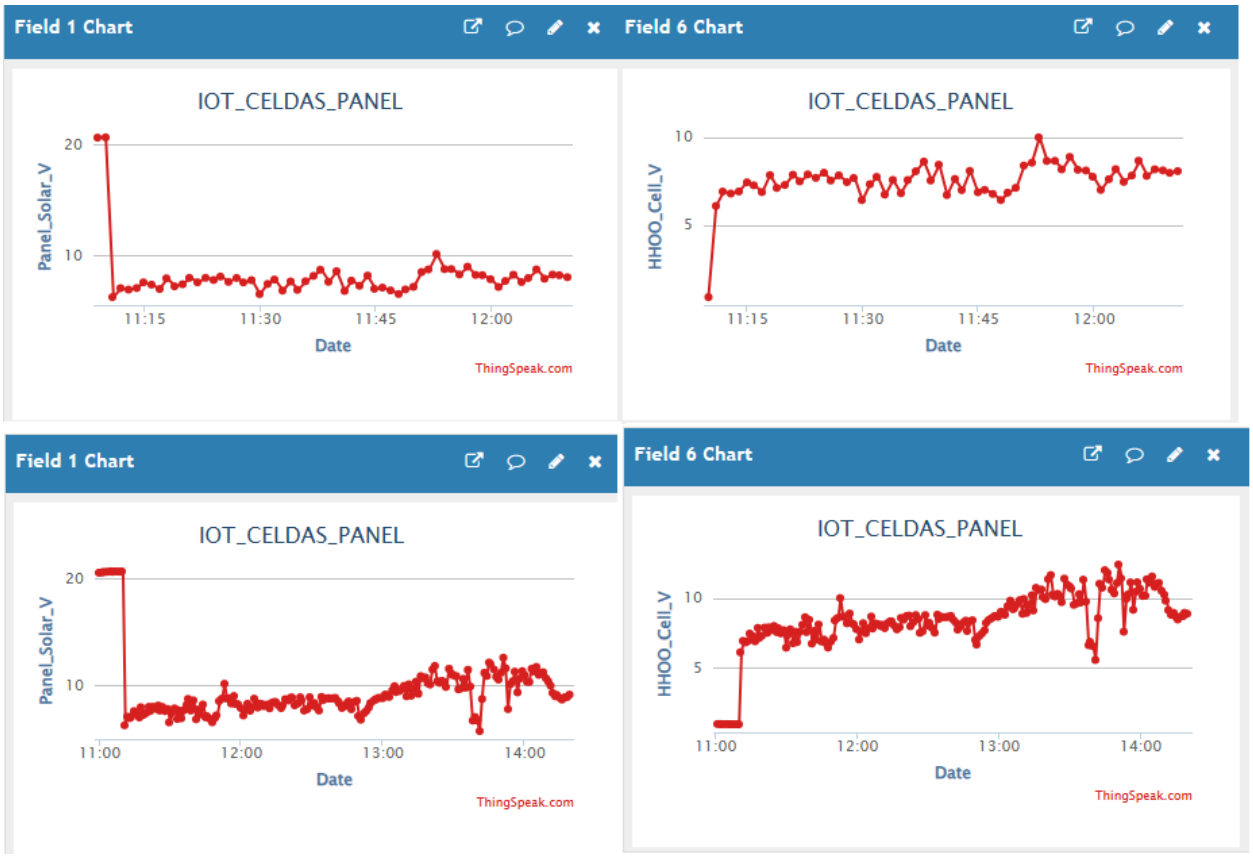


Figura 77. Voltaje de panel solar contra celda generadora a lo largo de 4 horas. Fuente propia.

La tabla 11 muestra algunos valores de las variables medidas en la prueba. Voltaje de panel, Corriente de panel, Potencia del panel, Voltaje de la celda generadora, Corriente celda generadora, potencia celda generadora y flujo de hidrogeno.

entry_id	Voltaje panel	Corriente panel	Potencia Panel	voltaje HHOO	Corriente HHOO	Potencia HHOO	Flujo HH
4628	7,62	0,26118674	1,990	7,55	0,29	2,1895	4.38029
4629	8,57	0,24942276	2,138	8,44	0,29	2,4476	4.04581
4630	6,80	0,26095596	1,774	6,72	0,36	2,4192	4.28638
4631	7,72	0,25601733	1,977	7,63	0,29	2,2127	3.38754
4632	7,26	0,25499068	1,851	7	0,29	2,03	4.60517
4633	8,18	0,24792401	2,028	8,09	0,29	2,3461	3.97602
4634	6,98	0,24826393	1,733	6,88	0,29	1,9952	5.1949
4635	7,10	0,24457074	1,735	7,01	0,29	2,0329	4.46156

4636	6,84	0,23843727	1,632	6,78	0,44	2,9832	4.19903
4637	0,65	0,24731596	0,161	6,43	0,38	2,4434	5.17386
4638	6,93	0,25625339	1,775	6,85	0,29	1,9865	6.61153
4639	7,17	0,27655725	1,982	7,13	0,29	2,0677	6.1
4640	8,56	0,29880276	2,558	8,39	0,29	2,4331	8.07819
4641	8,73	0,31402261	2,742	8,56	0,29	2,4824	8.03849
4642	10,13	0,32308002	3,271	10	0,29	2,9	6.79889
4643	8,76	0,32452676	2,842	8,65	0,29	2,5085	6.52301
4644	8,76	0,30828275	2,702	8,66	0,29	2,5114	7.27597
4645	8,28	0,30843332	2,553	8,18	0,29	2,3722	7.75105
4646	8,98	0,26559995	2,386	8,89	0,29	2,5781	7.33846
4647	8,24	0,29288663	2,414	8,15	0,29	2,3635	6.87817
4648	8,21	0,28387994	2,332	8,11	0,291	2,36001	7.68641
4649	7,85	0,27511609	2,161	7,76	0,29	2,2504	5.85839
4650	7,16	0,2811734	2,012	7,01	0,29	2,0329	6.53237
4651	7,69	0,27986392	2,153	7,62	0,29	2,2098	6.18121
4652	8,25	0,27855725	2,299	8,19	0,29	2,3751	7.2718
4653	7,60	0,28626663	2,175	7,47	0,291	2,17377	5.31882
4654	7,96	0,29161996	2,321	7,83	0,29	2,2707	6.19692
4655	8,73	0,28025327	2,447	8,67	0,29	2,5143	5.49486
4656	7,90	0,29958929	2,366	7,81	0,29	2,2649	5.29161
4657	8,27	0,29801059	2,464	8,18	0,291	2,38038	5.59574
4713	9,52	0,25056667	2,386	9,42	0,29	2,7318	2.19804
4714	9,90	0,25203342	2,496	0,1	0,29	0,029	2.28444
4715	9,34	0,25096263	2,345	9,19	0,29	2,6651	4.11466
4716	9,46	0,24682663	2,336	9,27	0,29	2,6883	3.14164
4717	9,65	0,23694267	2,286	9,57	0,29	2,7753	3.24488
4718	9,93	0,22641061	2,248	9,85	0,29	2,8565	3.67284
4719	8,95	0,2408	2,155	8,87	0,29	2,5723	4.5583
4720	10,06	0,23631329	2,378	9,93	0,291	2,88963	3.11258
4721	9,00	0,23412672	2,108	8,92	0,29	2,5868	4.27073
4722	9,63	0,22381062	2,155	9,55	0,42	4,011	3.17183
4723	10,32	0,24077608	2,485	10,2	0,291	2,9682	3.06356
4724	9,20	0,25516928	2,347	9,1	0,29	2,639	3.38441
4725	10,84	0,25134262	2,724	1,07	0,2	0,214	2.41455
4726	10,65	0,25211342	2,685	10,56	0,32	3,3792	3.31047
4727	10,72	0,25230663	2,705	1,06	0,29	0,3074	2.76762

4728	10,19	0,25446666	2,593	10,08	0,29	2,9232	2.83116
4729	10,05	0,25595999	2,573	9,92	0,4	3,968	3.02407
4730	11,47	0,25449994	2,918	11,36	0,291	3,30576	3.84271
4731	11,80	0,25447993	3,002	11,65	0,29	3,3785	3.73226
4732	10,37	0,25633594	2,658	10,23	0,291	2,97693	3.23221
4733	10,21	0,25773343	2,632	10,1	0,32	3,232	3.47605
4734	10,40	0,25812943	2,685	10,3	0,29	2,987	4.19265
4735	10,28	0,25865341	2,659	10,12	0,29	2,9348	3.52821
4736	9,83	0,25976657	2,552	9,7	0,29	2,813	3.40521

Tabla 11. Datos prueba con panel solar. Fuente propia.

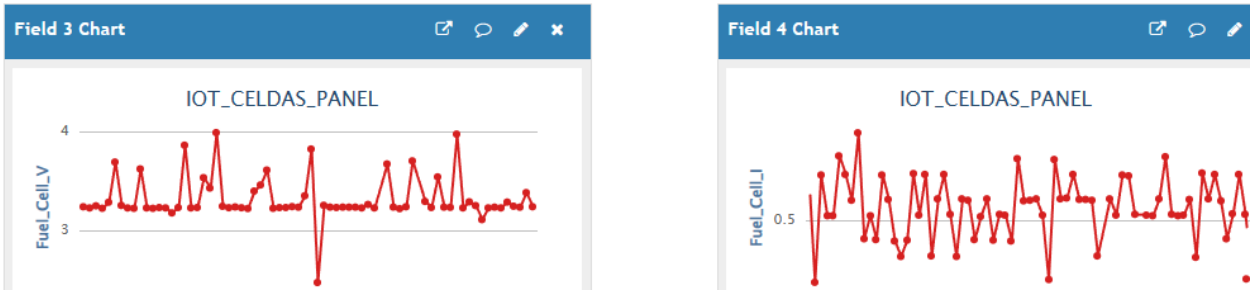


Figura 78. Voltajes y corrientes generados por la celda de combustible. Fuente propia.

La tabla 12 muestra los valores obtenidos del voltaje generado con la celda de combustible con el flujo de hidrogeno.

Entry id	Corriente Celda	Voltaje Celda	Flujo HH
4628	0.51600	3,22387	4,3803
4629	0.59333	3,22147	4,0458
4630	0.59333	3,228	4,2864
4631	0.60000	3,35973	3,3875
4632	0.52000	3,2204	4,6052
4633	0.52267	3,22427	3,9760
4634	0.59067	3,228	0,5195
4635	0.72000	3,17267	4,4616
4636	0.20400	3,2356	4,1990
4637	0.71333	3,22387	5,1739
4638	0.52000	3,2452	6,6115
4639	0.52000	3,22067	6,1000
4640	0.80400	3,28173	8,0782

4641	0.71600	3,688	8,0385
4642	0.59333	3,24907	6,7989
4643	0.91333	3,22387	6,5230
4644	0.41067	3,22013	7,2760
4645	0.52000	3,61853	7,7511
4646	0.40667	3,22413	7,3385
4647	0.71333	3,21987	6,8782
4648	0.59733	3,22787	7,6864
4649	0.40000	3,22413	5,8584
4650	0.32667	3,1736	6,5324
4651	0.40400	3,22813	6,1812
4652	0.72000	3,85827	0,7272
4653	0.52267	3,22413	5,3188
4654	0.71600	3,22813	6,1969
4655	0.32933	3,53	5,4949
4656	0.60000	3,4252	5,2916
4657	0.71600	3,98587	5,5957
4713	0.52667	3,24067	2,1980
4714	0.32667	3,22613	2,2844
4715	0.60000	3,23387	4,1147
4716	0.59333	3,22587	3,1416
4717	0.40667	3,21813	3,2449
4718	0.51600	3,3944	3,6728
4719	0.60000	3,45613	0,4558
4720	0.40400	3,6068	3,1126
4721	0.52667	3,22027	4,2707
4722	0.52267	3,2276	3,1718
4723	0.40000	3,228	3,0636
4724	0.79067	3,23733	3,3844
4725	0.59067	3,23173	2,4146
4726	0.59333	3,34707	3,3105
4727	0.60000	3,8196	2,7676
4728	0.52267	2,46947	2,8312
4729	0.21733	3,25053	3,0241
4730	0.78667	3,23213	3,8427
4731	0.60000	3,22813	3,7323
4732	0.60400	3,23213	3,2322

4733	0.71600	3,23173	3,4761
4734	0.59733	3,232	4,1927
4735	0.59733	3,22413	3,5282
4736	0.59333	3,25907	3,4052

Tabla 12. Datos prueba celda de combustible. Fuente propia.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede concluir que en tema energético cuando el sistema está activo generando hidrogeno se puede apreciar lo siguiente:

- La potencia entregada por el panel solar fue de 2.34 vatios hora.
- La potencia consumida por la celda separadora de gases fue de 2.48 vatios hora
- El flujo promedio de hidrogeno generado fue de 4,46 SCCM
- El voltaje generado con la celda de combustible fue de aproximadamente 3,3 V
- La corriente generada con la celda de combustible fue aproximadamente de 0.6 A
- La potencia generada fue de aproximadamente 1.98 Vatios hora.

Con los datos anteriores se puede hacer una proyección para poder consumir 2000 ml de agua con electrolito al 20% a un flujo de 4,46 SCCM

partiendo de la fórmula del SCCM

$$SCCM = \left(Flujo\ en \frac{ml}{\min}\right) * \frac{273.15\ K}{T+273.15\ K} * \left(\frac{P\ atm}{101.325\ kpa}\right) \quad (3)$$

en condiciones atmosféricas estándar y temperatura ambiente como lo es aquí en Bogotá que está en un promedio de 15 grados Celsius se tiene que:

$$SCCM = \left(Flujo\ en \frac{ml}{\min}\right) * \frac{273.15\ K}{15\ °C+273.15\ K} * \left(\frac{101.325\ kpa}{101.325\ kpa}\right) \quad (4)$$

$$SCCM = \left(Flujo\ en \frac{ml}{\min}\right) * 0.958 \quad (5)$$

Despejando el flujo con el fin de calcular mejor un consumo de SCCM en ml.

$$\left(Flujo\ en \frac{ml}{\min}\right) = \frac{SCCM}{0.958} \quad (6)$$

Sabiendo que el flujo promedio medido en SCCM fue de 4.46, se reemplaza en la ecuación 6 y tenemos que el consumo en ml de los SCCM generados fue de.

$$\frac{4.46}{0.958} = 4.65\ ml/min \quad (7)$$

Ya teniendo la razón de mili litros por minutos se puede calcular el tiempo que tardará en consumirse los 2000 ml que fueron vertidos en el tanque

$$\frac{2000\ ml}{4.65\ ml/min} = 429.89 min \cong 7.16\ horas \quad (8)$$

En un tiempo aproximado de 7.16 horas se consume toda la solución de agua, teniendo en cuenta que los usos de hora sol son limitados según los rangos establecidos. Se necesitan dos días con el panel solar actual para poder consumir toda la solución.

En cuanto a eficiencia energética la potencia promedio entrega por el panel solar fue 2,34 vatios hora divido por el tiempo de uso para consumir el líquido se requiere **una potencia total de 326,81 mili vatios.**

La potencia generada por la celda de combustible es de 1.98 vatios hora multiplicando por el tiempo de funcionamiento se requiere **una potencia de 276.53 mili vatios.**

Para calcular la eficiencia del sistema se tiene la siguiente formula.

$$\frac{Potenica\ de\ salida}{Potencia\ de\ entrada} * 100\% \quad (9)$$

$$\frac{276.53\ w}{326.81\ w} * 100\% = 84.61\% \quad (10)$$

La eficiencia energética escalada en el tiempo con la cantidad de hidrogeno generado nos arroja el dato del 84.61% lo cual nos indica una pérdida de 15.31% en el proceso.

8. Conclusiones y Recomendaciones

.

Conclusiones

Para que el sistema tenga una buena eficiencia es necesario que el flujo sea constante, para garantizar esto es preciso aumentar la potencia de entrada de los paneles o usar otras fuentes de energía que funcionen para complementar la fuente primaria (por ejemplo)

Las pruebas realizadas a lo largo del desarrollo de este documento permiten concluir que:

- La eficiencia del sistema es bastante buena a pesar de las pérdidas que se obtienen en las conversiones de energía, si se desea una mayor generación energética en menor tiempo es necesario garantizar un buen flujo de gases de las celdas generadoras.
- Para que el sistema tenga una buena eficiencia es necesario que el flujo sea constante, para garantizar esto es preciso aumentar la potencia de entrada de los paneles o usar otras fuentes de energía que funcionen para complementar la fuente primaria.
- Para mejorar el rendimiento de la celda de combustible es necesario un módulo de captación de gas con el fin de liberarlo con una presión ideal y flujo constante hacia la celda de combustible.
- Aplicar este tipo de sistemas en la actualidad para la vida cotidiana de una familia y así esta pueda aprovechar los beneficios de las energías renovables requiere de una inversión bastante grande ya que son necesarios sistemas de almacenamiento tanto para la energía fotovoltaica como para los gases generados por las celdas. Es importante tener en cuenta que las líneas de distribución para estos sistemas deben ser robustas que no se vean afectadas fácilmente por la corrosión con el tiempo y sobretodo que garantice la seguridad e integridad de las personas que habiten el hogar.

Recomendaciones

- Se recomienda a la comunidad académica de la universidad distrital tener en cuenta este documento para futuros proyectos relacionados con energías renovables. Pues existen varios puntos que se pueden retomar para mejorar el sistema. Como lo pueden ser doblar la potencia de entrada para así obtener más flujo de hidrogeno en la celda separadora. Realizar un sistema de almacenamiento para garantizar un flujo contante al ingreso de la celda de combustible y con ello tener una mejor producción de voltaje. Entre otros que se puedan detectar.

- Al trabajar con soda cáustica en concentraciones del 15% al 30%, es crucial tener en cuenta los riesgos para la salud del usuario. Por lo tanto, se recomienda implementar protocolos estrictos de manejo y protección personal, incluyendo el uso de equipo de protección adecuado (guantes, gafas, máscara, etc.) y la capacitación del personal en técnicas de manipulación segura.
- Se recomienda reducir el tamaño de los tanques de la celda separadora de gases. Esto acelerará la producción de gases al disminuir el tiempo necesario para llenar las cavidades antes de su emisión del sistema.
- Se recomienda evitar el uso de acoples y racores plásticos en el sistema. Estos materiales son propensos a la corrosión y rotura al estar expuestos a las soluciones de NaOH y agua, lo que puede generar fugas y riesgos de seguridad, tanto biológicos como eléctricos, especialmente si las celdas productoras no están adecuadamente aisladas. Se recomienda sustituir los componentes plásticos por materiales resistentes a la corrosión, como acero inoxidable o PVC de alta calidad.
- Se recomienda implementar un mejor acondicionamiento de las señales de los sensores de flujo. Esto permitirá obtener mediciones más precisas y confiables, al mismo tiempo que se eliminarán señales y ruidos indeseados que podrían afectar el rendimiento del sistema. Se sugiere utilizar filtros electrónicos y técnicas de procesamiento de señales adecuadas para optimizar la calidad de las mediciones.
- Para mejorar la producción y estabilizar el voltaje en la celda separadora, se recomienda duplicar la potencia de entrada del panel solar. Esto se puede lograr añadiendo un módulo solar adicional en paralelo al existente, lo que aumentará la corriente disponible para satisfacer la demanda de la celda.
- Si se planea utilizar el combustible para otro propósito que no sea alimentar la celda de combustible, se recomienda instalar un sistema arresta llama. Este sistema evitará la propagación de llamas en caso de una fuga o ignición accidental del combustible, mejorando la seguridad del sistema
- Se recomienda tener un sistema de almacenamiento y que permita salir el hidrogeno a una presión adecuada para alimentar la celda de combustible. Esto mejoraría mucho el desempeño del proyecto.

9. Referencias

Ada Fruit . (s.f.). *Ada Fruit* . Obtenido de https://learn.adafruit.com/adafruit-ina219-current-sensor-breakout/overview

Aguilar, I. (2017). *Evaluación de alternativas para potencializar el uso de hidrógeno como vector energético.* Universidad Nacional., Bogotá. Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59336

Aliexpress. (s.f.). *Aliexpress*. Obtenido de https://es.aliexpress.com/item/32831096592.html?gatewayAdapt=glo2esp

Amazon. (s.f.). *Amazon* . Obtenido de regulador panel solar mppt 5a con indicador de carga (mactronica.com.co)

Clemente, M. (2012). *Comparación de tecnologías de almacenamiento energético provenientes de energías renovables.* Anales de la real academia de doctores de españa. Obtenido de https://oa.upm.es/15743/1/INVE_MEM_2012_130263.pdf

Cumbres Pueblos. (2019). Efecto fotovoltaico, ¿Qué es, Cómo se porduce? *Cumbres Pueblos*. Obtenido de https://cumbrepuebloscop20.org/energias/solar/efecto-fotovoltaico/

Ebay. (s.f.). *Ebay* . Obtenido de INA219 DC Current Sensor Breakout Module - Blue (advanced.mu)

Electronilab. (s.f.). *Electronilab*. Obtenido de https://electronilab.co/tienda/ads1115-conversor-analogico-digital-adc/

Ezquivel, J., Vizcarra, M., Garcia, F., & Buser, J. (2016). *Electrical generator device including a fuel cell.* DIGITAL.CSIC, el repositorio institucional del Consejo Superior de Investigaciones Cientificas , Washington D. C. Obtenido de http://hdl.handle.net/10261/176070

Guerra, M., Montaño, J., & Ascanio, N. (2021). Implementación de energías renovables como garantía al derecho fundamental a un ambiente sano en Colombia. *CES Derecho*, 20. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S2145-77192021000200087&script=sci_arttext

Jimenez, & Marin. (2021). *Diseño e implemetación de una celda generadora de hidrogeno en un motor de combustión interna en la ciudad de Bogotá.* Universidad Distrital-RUID., Bogotá. Obtenido de https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/28510

Jimenez, F. (2020). *Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento fosil.* Universidad de Chile., Santiago de Chile. . Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175586

Jimenez, Orozco, & Acevedo. (2015). *Energía eólica para la producción de hidrógeno mediante una espiral Electrolyzer.* Universidad de Cartgena, Cartagena. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/282179578_Wind_power_for_hydrogen_production_using_a_spiral_electrolyzer

Last Minute Engineers . (s.f.). *Last Minute Engineers* . Obtenido de https://lastminuteengineers.com/esp8266-pinout-reference/

Lopez, F., & al., e. (2018). *fuel cells with lifting converters for alternative energies.* Universidad Tecnológica de La Habana; Universidad Autónoma de Zacatecas, La Habana; Zacatecas. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1815-59012019000100003&lng=es&nrm=iso

Mendez, J., & Cuervo, R. (2011). *Energia Solar Fotovoltaica.* FC editorial . Obtenido de www.perlego.com/es/book/3189304/energa-solar-fotovoltaica-7-edicin-pdf

Montaña, C. (2018). *nálisis de la conveniencia de la implementación de celdas de combustible PEM a base de hidrogeno en el sistemma de iluminación en el edificio TransCoop.* Universidad Distrital-UNIR, Bogotá. Obtenido de - hdl:11349/13940

Perpiñan, O. (2013). *Energia solar fotovoltaica.* GitHub. Obtenido de http://procomun.wordpress.com/documentos/libroesf

Posso, & al, e. (2016). *Estimación del potencial de producción de Hidrógeno a partir de energia solar fotovoltaica en Ecuador.* . Univerdidad de Cuenca , Cuenca. Obtenido de https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/62/60

Revistahypatia. (s.f.). ¿Cómo funcionan las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico? *Revistahypatia*, 1. Obtenido de https://revistahypatia.org/jbwjv/civuh/49/205/

Romero, J. (2018). *Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción.* Universidad de Valladolid, Valladolid. Obtenido de http://uvadoc.uva.es/handle/10324/31495

Sunera. (s.f.). *Sunera.* Obtenido de https://www.nasadecolombia.com/wp-content/uploads/2023/07/Panel-Solar-SUNERA-60W-MONO.pdf

Velasquez, J., & Quiceno, J. (2013). *Diseño de un sistema de deneración de hidrogeno por electrólisis.* Universidad Tecnologica de Pereira., Pereira. Obtenido de ::Inicio. https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/fb85c231-3998- 4139-8555-071d991aa733/content content (utp.e

Villaroel, R. C. (2013). *Universidad de cataluña.* Obtenido de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19463/Mem%c3%b2ria.pdf?isAllowed=y&sequence=1

Vivienda la revista de la construcción. (2019). Funcionamiento de las células solares fotovoltaicas. *Vivienda la revista de la construcción.*, 1. Obtenido de http://www.revistavivienda.com.ar/empresas/novedades-del-mercado/funcionamiento-de-las-celulas-solares-fotovoltaicas

Winsen. (03 de 11 de 2020). *Winsen* . Obtenido de f1012-flow-sensor---manual-v2_3.pdf (winsen-sensor.com)

Zamper Store. (s.f.). *Zamper Store*. Obtenido de INA3221 Sensor de Voltaje y corriente 3 canales (zamperstore.cl

.