

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño de un módulo experimental automatizado de reconversión
energética del H₂ para uso en vivienda unifamiliar

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Automatización

Presentado por:

Kevin Ramiro Guanoluisa Guevara

Hernán Alfonso Alvarez Ochoa

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mis padres quienes siempre me apoyaron en cada etapa de mis estudios.

Kevin Ramiro Guanoluisa Guevara

A mis padres por su sacrificio y esfuerzo. Estoy contento de terminar con una meta que me propuse hace mucho tiempo, que ustedes no dejaron de apoyarme, y como todo objetivo cumplido más vendrán, con su consejos y crianza he podido culminar esta etapa de mi vida.

Hernán Alfonso Álvarez Ochoa

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Fausto Guanoluisa y Andrea Guevara, por su constante apoyo durante toda mi carrera. A nuestros profesores, el PhD. Wilton Agila y el Msc. Dennys Cortez quienes siempre nos guiaron hasta la culminación del presente proyecto. A mis amigos también por brindarme ánimos en toda mi vida estudiantil.

Kevin Ramiro Guanoluisa Guevara

Agradezco a mis padres por brindarme la oportunidad de seguir estudiando, apoyándome a formar un futuro y siendo mis ejemplos de superación. A mi abuelo por demostrarme que para ser feliz no necesito mucho, a mi abuela por aconsejarme. Son muchas las personas que han compartido conocimiento conmigo, por ustedes este camino universitario ha sido ameno.

Hernán Alfonso Álvarez Ochoa

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Kevin Ramiro Guanoluisa Guevara y Hernán Alfonso Álvarez Ochoa damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Kevin Guanoluisa

Kevin Ramiro Guanoluisa Guevara

Hernán Alfonso

Hernán Alfonso Alvarez Ochoa

EVALUADORES

.....
Msc. Dennys Dick Cortez Alvarez

PROFESOR DE LA MATERIA



.....
PhD. Wilton Edixon Agila Gálvez

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El uso de energías renovables, tal como los sistemas fotovoltaicos, es común en las viviendas rurales para el desarrollo de las actividades diarias, también suelen utilizar baterías o grupos electrógenos que a pesar de generar electricidad producen constante contaminación al ambiente. Un sistema capaz de generar energía limpia y renovable es ideal para reducir la contaminación y representa un ahorro en la economía de las familias.

Se desarrolló la simulación de un sistema basado en hidrógeno para abastecer la demanda de energía en una vivienda unifamiliar. El sistema diseñado es similar a un sistema fotovoltaico con la diferencia de que se reemplaza la batería de litio por un electrolizador, bombona y pila de combustible. El electrolizador permite generar hidrógeno para ser almacenado en una bombona y luego ser consumido por la pila de combustible dando lugar a corriente continua y con un inversor obtener corriente alterna.

Con la simulación del sistema, se determina que usar hidrógeno es menos eficiente que un sistema convencional que comúnmente utiliza baterías de litio. Tampoco es viable económicamente puesto que las tecnológicas y equipos usados para producir hidrógeno y convertirlo en electricidad no son muy comunes en el mercado lo cual aumenta su valor.

Palabras Clave: Electricidad, Hidrógeno, Electrolizador, Eficiente, Renovable.

ABSTRACT

The use of renewable energies, such as photovoltaic systems, is common in rural homes for the development of daily activities, they also tend to use batteries or generator sets that, despite generating electricity, constantly pollute the environment. A system capable of generating clean and renewable energy is ideal for reducing pollution and represents savings in the economy of families.

The simulation of a hydrogen-based system was developed to supply the energy demand in a single-family home. The designed system is similar to a photovoltaic system with the difference that the lithium battery is replaced by an electrolyser, cylinder and fuel cell. The electrolyser allows hydrogen to be generated to be stored in a cylinder and then consumed by the fuel cell, giving rise to direct current and with an inverter to obtain alternating current.

With the simulation of the system, it is determined that using hydrogen is less efficient than a conventional system that commonly uses lithium batteries. It is also not economically viable since the technologies and equipment used to produce hydrogen and convert it into electricity are not very common in the market, which increases its value.

Keywords: Electricity, Hydrogen, Electrolyser, Efficient, Renewable.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Módulo experimental.....	4
1.4.2 Hidrógeno	4
1.4.3 Obtención de hidrógeno.....	5
1.4.4 Electrólisis del agua	6
1.4.5 Almacenamiento de hidrógeno	7
1.4.6 Pila de combustible de hidrógeno.....	7
1.4.7 Reconversión energética del hidrógeno mediante energía solar	8
CAPÍTULO 2.....	10
2. Metodología	10
2.1 Dimensionamiento de los equipos del sistema.....	10
2.1.1 Dimensionamiento de la carga.....	10

2.1.2	Dimensionamiento del panel fotovoltaico.....	13
2.1.3	Dimensionamiento del inversor regulador.....	16
2.1.4	Dimensionamiento del electrolizador	17
2.1.5	Dimensionamiento de la bombona de hidrógeno.....	18
2.1.6	Dimensionamiento de la pila de hidrógeno	19
2.1.7	Dimensionamiento del sistema convencional	20
2.2	Simulación del sistema de hidrógeno	21
2.2.1	Simulación de la carga.....	22
2.2.2	Simulación del panel fotovoltaico.....	23
2.2.3	Simulación del inversor regulador.....	24
2.2.4	Simulación del electrolizador	31
2.2.5	Simulación de la bombona de hidrógeno.....	31
2.2.6	Simulación de la pila de hidrógeno	32
2.3	Esquemático del sistema.....	37
2.4	Diagrama de conexiones eléctricas y fluídicas.....	37
2.5	Simulación del sistema convencional.....	39
CAPÍTULO 3.....		40
3.	Resultados y análisis	40
3.1	Respuesta del sistema de hidrógeno	42
3.1.1	Escenario de circuito abierto.....	42
3.1.2	Escenario de circuito con carga	43
3.2	Respuesta eléctrica de la pila de combustible.....	44
3.2.1	Respuesta ante variación de la presión	44
3.2.2	Respuesta ante variación del caudal	46
3.3	Respuesta del sistema convencional	48
3.4	Análisis de costos.....	52
3.4.1	Costo del sistema basado en hidrógeno.....	52

3.4.2 Costo del sistema convencional.....	53
3.5 Módulo experimental	54
CAPÍTULO 4.....	55
4. Conclusiones y recomendaciones	55
Conclusiones.....	55
Recomendaciones.....	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57
APÉNDICES.....	59

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
AEL	Electrolizador alcalino
PEM	Membrana electrolítica de polímero
SOE	Electrolizador de óxido sólido
SPWM	Modulación por ancho de pulso senoidal
PWM	Modulación por ancho de pulso
MPPT	Seguidor del punto de máxima potencia
P&O	Perturbación y observación
DC	Corriente continua
AC	Corriente alterna

SIMBOLOGÍA

L	Litro
mL	Mililitro
g	gramo
Kg	Kilogramo
h	Hora
min	Minuto
lpm	Litro por minuto
V	Voltaje
A	Amperio
W	Vatio
kW	Kilovatio
KWh	Kilovatio hora
KHz	Kilohercio
uH	Microhenrio
mH	Milihenrio
uF	Microfaradio
mF	Milifaradio
H	Hidrógeno
O	Oxígeno
H ₂ O	Agua

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tipos de electrolizador [7]	6
Figura 1.2 Reconversión energética de hidrógeno mediante energía solar [12].....	9
Figura 2.1 Diagrama de flujo del sistema	10
Figura 2.2 Evolución del consumo de energía eléctrica [13]	10
Figura 2.3 Nivel de irradiación solar en Guayaquil	13
Figura 2.4 Panel solar JAM72S20-465/MR [16]	15
Figura 2.5 Inversor Cargador Growatt SPF 6000T DVM [17]	17
Figura 2.6 Electrolizador PEM CH-5000 [18].....	18
Figura 2.7 Bombonas de hidrógeno	19
Figura 2.8 Pila de combustible H-2000 [19].....	19
Figura 2.9 Convertidor elevador	20
Figura 2.10 Sistema convencional [20].....	20
Figura 2.11 Simulación del sistema basado en hidrógeno	21
Figura 2.12 Interfaz de usuario.....	22
Figura 2.13 Simulación de la carga	23
Figura 2.14 Circuito eléctrico de panel solar [21].....	23
Figura 2.15 Configuración del bloque del panel solar.....	24
Figura 2.16 Modelo del convertidor reductor con MPPT	25
Figura 2.17 Modelo del convertidor elevador.....	26
Figura 2.18 Modelo del inversor SPWM	29
Figura 2.19 Modelo del electrolizador.....	31
Figura 2.20 Modelo del sistema de almacenamiento	32
Figura 2.21 Modelo de la pila de hidrógeno [22].....	32
Figura 2.22 Bloque de la pila de hidrógeno	35
Figura 2.23 Configuración del bloque de la pila de hidrógeno.....	35
Figura 2.24 Esquemático del sistema.....	37
Figura 2.25 Diagrama de conexiones.....	37
Figura 2.26 Sistema en 3D	38
Figura 2.27 Producción de hidrógeno en 3D	38
Figura 2.28 Simulación del sistema convencional	39
Figura 3.1 Irradiancia solar	40
Figura 3.2 Parámetros del arreglo de paneles solares	41

Figura 3.3 Parámetros de la pila de combustible.....	41
Figura 3.4 Voltaje y corriente del sistema de hidrógeno sin carga	42
Figura 3.5 Potencia de los equipos del sistema de hidrógeno sin carga	43
Figura 3.6 Voltaje y corriente de la carga del sistema de hidrógeno	43
Figura 3.7 Potencia de los equipos del sistema de hidrógeno.....	44
Figura 3.8 Eficiencia vs corriente con 1.5 Bar de H ₂	45
Figura 3.9 Eficiencia vs consumo de H ₂ con 1.5 Bar de H ₂	45
Figura 3.10 Eficiencia vs corriente con el 50% de caudal de H ₂	47
Figura 3.11 Eficiencia vs consumo de H ₂ con el 50% de caudal de H ₂	47
Figura 3.12 Voltaje y corriente de los paneles del sistema convencional	48
Figura 3.13 Voltaje, corriente y SOC de la batería del sistema convencional	49
Figura 3.14 Voltaje y corriente de la carga del sistema convencional	50
Figura 3.15 Potencia de los equipos del sistema convencional.....	50
Figura 3.16 Amortización del kit solar [20].....	53
Figura 3.17 Módulo experimental del sistema de hidrógeno	54
Figura 3.18 Producción de hidrógeno con el módulo experimental	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Consumo de los electrodomésticos durante el día [14]	11
Tabla 2.2 Consumo de los electrodomésticos durante la noche [14]	11
Tabla 2.3 Comparación de parámetros de paneles solares	15
Tabla 2.4 Parámetros del panel fotovoltaico JAM72S20-465/MR [16]	15
Tabla 3.1 Resultados de la pila de combustible con 1.5 Bar de H ₂	46
Tabla 3.2 Resultados de la pila de combustible con 50% caudal de H ₂	48
Tabla 3.3 Eficiencia de la pila PEM y la batería.....	51
Tabla 3.4 Detalle de costos de los equipos del sistema de hidrógeno	52
Tabla 3.5 Detalle de costos de los equipos del sistema convencional [20]	53

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la producción y distribución de electricidad logra satisfacer una determinada demanda en función de la población permitiéndoles el desarrollo de sus actividades diarias. Para ello existe distintos tipos de centrales eléctricas que permiten obtener electricidad a partir de otro tipo de energía. Las centrales eléctricas son muy comunes en todo el mundo puesto que ponen en funcionamiento el sector productivo de cada país permitiendo así el flujo de la economía. Al igual que toda industria, la industria energética genera contaminación mediante sus centrales eléctricas derivadas del petróleo, las cuales producen gases de efecto invernadero que resultan perjudiciales para el medio ambiente. Una gran cantidad de gases de efecto invernadero produce un aumento significativo en la temperatura atmosférica a lo cual se conoce como calentamiento global. La generación de energía eléctrica es importante en todo el mundo, por ello las centrales eléctricas cumplen con dicha labor a pesar de la contaminación que producen. Bajo este contexto, es un desafío la transición a otro tipo de tecnologías que permitan generar energía eléctrica al mismo costo que los sistemas convencionales y sin producir contaminantes.

A pesar de que la energía eléctrica es fundamental para la sociedad, aún hay una parte del sector rural que no puede acceder a dicho servicio básico debido a su ubicación. El uso de energía solar es común en las viviendas rurales, sin embargo, en la noche usan baterías o generadores eléctricos para energizar sus viviendas. Estos generadores suelen usar combustible fósil generando mayor contaminación y también representa un alto costo que afecta a las familias del sector. Por tanto, un sistema capaz de generar electricidad sin mayor costo y de forma limpia es una solución ideal que a largo plazo representa una mejora tanto para el medio ambiente como para la economía de las familias.

1.1 Descripción del problema

Muchas viviendas rurales al estar muy alejadas de la ciudad no pueden acceder al servicio de electricidad puesto que las redes eléctricas no llegan a cubrir todas las áreas rurales dando prioridad a las áreas urbanas. El uso de energías renovables, como la energía solar, es muy común en las viviendas rurales para obtener electricidad durante el día y permitir que las familias desarrollen sus actividades diarias. Sin embargo, en la noche es más común el uso de un banco de baterías o incluso generadores eléctricos que suelen usar combustible fósil representando así un elevado costo para las familias y generando mayor contaminación para el ambiente. Por tanto, es fundamental buscar soluciones de energías renovables, cada vez más limpias y menos contaminantes para sustituir los sistemas convencionales que producen constantemente contaminación.

1.2 Justificación del problema

La implementación de un módulo experimental sostenible, donde el suministro de energía eléctrica es escaso, es una solución viable que nos ayudará a desarrollar el acceso al recurso eléctrico a poblaciones vulnerables. El presente proyecto plantea un sistema capaz de generar energía eléctrica de forma limpia y renovable a partir del hidrógeno verde, dicho sistema solo emite vapor de agua evitando así la producción de gases de efecto invernadero que son dañinos para el ambiente resultando así una forma limpia de generar energía eléctrica.

Además, es una solución factible para las poblaciones vulnerables donde no llegan los servicios de electricidad y por lo general usan generadores eléctricos, banco de baterías o paneles solares para suministrar energía eléctrica a sus viviendas. Estos paneles son usados durante el día mientras que en la noche no hay energía solar para obtener electricidad. Por tanto, el sistema planteado genera hidrógeno durante el día mediante los paneles solares para luego en la noche utilizar la energía almacenada en forma de hidrógeno evitando el así uso de baterías o generadores eléctricos que causan los problemas ya mencionados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un módulo experimental automatizado de reconversión energética del H₂ para la generación de energía limpia mediante tecnologías renovables.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información del consumo energético de viviendas unifamiliares para el dimensionamiento del módulo experimental.
- Diseñar un módulo experimental de hidrógeno verde orientado a la generación de energía eléctrica para consumo residencial.
- Realizar un análisis de costos para la futura implementación del sistema automatizado de reconversión energética del H₂.
- Comparar el sistema automatizado de reconversión energética del H₂ con sistemas convencionales para medir su eficiencia.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Módulo experimental

Los módulos experimentales deben ser bien estructurados y organizados, que permitan ser utilizados a modo de guía para su funcionamiento y uso pudiéndose adaptar en diferentes aplicaciones. Se construyen tomando en cuenta el propósito deseado y cumple distintos patrones específicos que determinan su buen funcionamiento o secuencia, estos son: diseño de montajes, construcción, e interpretación de resultados los cuales se detallan a continuación:

- **Diseño:** Se desarrollan los patrones de montaje, construcción y las fases de prueba para comprender su funcionamiento y efectividad, mejorando y aportando ideas, pero fundamentalmente respetando el modelo inicial.
- **Construcción:** Tal como su nombre indica, esta etapa se orienta al manejo de los materiales, proceso de elaboración, construcción y funcionamiento.
- **Interpretación de resultados:** Se realiza la medición, toma de datos y análisis para demostrar la verdadera necesidad del proyecto e impacto en la sociedad.

1.4.2 Hidrógeno

El hidrógeno es el primer elemento químico de la tabla periódica y se representa mediante el símbolo H, es estable en su forma diatómica H₂ la cual se encuentra como estado gaseoso en condiciones normales y presenta distintas características tales como insípido, inodoro e incoloro además de ser limpio e inflamable [1]. Existen distintos tipos de hidrógeno los cuales se clasifican según cuanta contaminación genera el proceso para su obtención:

- **Hidrógeno gris:** Se obtiene mediante el uso de sistemas convencionales, es decir, procesos que usan combustible fósil los cuales generan gases de efecto invernadero representando mayor contaminación para el medio ambiente [2].

- **Hidrógeno azul:** Se obtiene usando tecnologías que permiten disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero respecto al hidrógeno gris [2].
- **Hidrógeno verde:** Este hidrógeno se obtiene de forma limpia y renovable, es decir, no se produce contaminación para obtener este elemento [2].

El hidrógeno verde es costoso en comparación a los sistemas convencionales de energía ya existentes, por ello este hidrógeno no es muy utilizado como fuente de energía a nivel comercial. El hidrógeno gris es más común puesto que usa los sistemas convencionales basados en combustible fósil, esto representa mayor contaminación, pero menor costo por lo cual es más usado en la actualidad [3].

1.4.3 Obtención de hidrógeno

El hidrógeno se encuentra en grandes cantidades en el ambiente, sin embargo, está combinado con otros elementos químicos por lo cual no puede obtenerse directamente lo que hace necesario aplicar algún tipo de proceso para la obtención del hidrógeno [4]. Existen distintos procesos para obtener hidrógeno:

- **Proceso químico:** Este proceso requiere de altas temperaturas para la obtención del hidrógeno, la energía térmica requerida proviene de la combustión del mismo material (carbón e hidrocarburos) que se procesa [5].
- **Proceso termolítico:** Al igual que el proceso químico, usa energía térmica sobre un material (agua o hidrocarburo) para obtener hidrógeno, en este caso el calor utilizado proviene de una fuente externa tal como la energía solar [5].
- **Proceso electrolítico:** Utiliza electricidad, sin importar su origen, para descomponer las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno lo cual evita la emisión de gases de efecto invernadero según la fuente de energía usada [5].
- **Proceso fotolítico:** Usa la radiación solar para producir la hidrólisis del agua, sin embargo, este tipo de proceso aún corresponde a temas investigativos [5].

1.4.4 Electrólisis del agua

El agua está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno lo cual se evidencia en su fórmula química H_2O , por tanto, mediante la electrólisis se pueden separar dichos gases. Este proceso consiste en aplicar una corriente continua (DC) entre dos electrodos separados por una membrana en el agua, en el cátodo se obtiene el hidrógeno mientras que en el ánodo estará el oxígeno [5]. El equipo que permite realizar este proceso se conoce como electrolizador y existen distintos tipos los cuales se visualizan en la figura 1.1 y son:

- **Electrolizador alcalino (AEL):** Este tipo de electrolizador utiliza iones de hidróxido (OH^-) los cuales se transportan por medio del electrodo del cátodo hasta el ánodo dando lugar a que el hidrógeno se produzca en el cátodo [6].
- **Electrolizador de membrana polimérica (PEM):** Este electrolizador utiliza una membrana electrolítica de polímero. El agua reacciona al electrodo del ánodo formando oxígeno e iones de hidrógeno con carga positiva, dichos iones se mueven a través de la membrana hasta el cátodo donde se combinan con los electrones del circuito formando el hidrógeno en estado gaseoso [6].
- **Electrolizador de óxido sólido (SOE):** A diferencia de los anteriores electrolizadores, este es de alta temperatura y su tecnología aún está en desarrollo. Utiliza un electrodo de material cerámico para conducir iones de oxígeno (O^{2-}) con carga negativa dando lugar al hidrógeno [6].

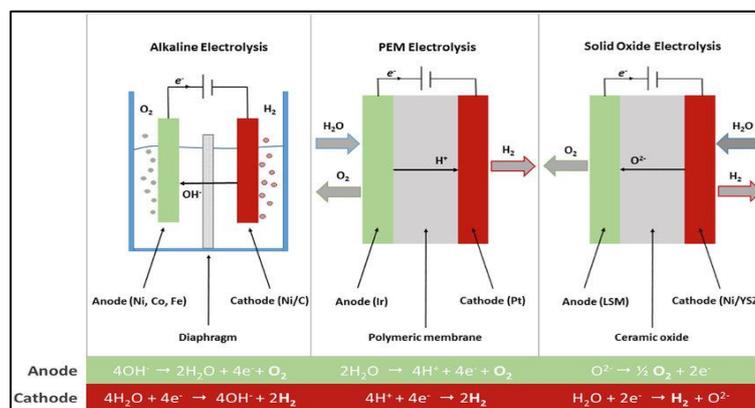


Figura 1.1 Tipos de electrolizador [7]

1.4.5 Almacenamiento de hidrógeno

El hidrógeno posee una alta densidad energética por unidad de masa, sin embargo, por unidad de volumen tiene una baja densidad lo cual hace necesario de grandes recipientes para su almacenamiento [8]. Existen distintas formas de almacenar este elemento las cuales se detallan a continuación:

- **Gas comprimido:** Es la forma de almacenamiento más difundida y menos costosa, almacenando el hidrógeno en forma gaseosa teniendo la posibilidad de guardarlo en depósitos móviles, estacionarios o subterráneos. Además, requiere de mayor volumen y presión debido a la densidad del hidrógeno [8].
- **Líquido criogénico:** Se obtiene a partir de la licuación del hidrógeno, este proceso convierte el gas en líquido permitiendo almacenar mayor cantidad de hidrógeno en menor volumen. Esta forma de almacenar hidrógeno es más costosa debido a que los equipos deben operar a muy bajas temperaturas [8].
- **Hidruros metálicos:** Es el material más prometedor para el almacenamiento de hidrógeno, su tecnología se ha venido desarrollando durante décadas dando como resultado almacenamiento en estado sólido. Opera en condiciones normales, sin embargo, su baja capacidad de almacenamiento limita su aplicación respecto a las anteriores formas de almacenamiento [8].

1.4.6 Pila de combustible de hidrógeno

La pila de combustible es un equipo electroquímico de alta tecnología que convierte la energía química del combustible que consume, generalmente hidrógeno, produciendo agua y energía eléctrica en forma de corriente continua (DC). Uno de los reactivos de la pila es siempre oxígeno, que actúa oxidante en el cátodo y dada su disponibilidad en el aire, no es necesario almacenar. Una pila de combustible tiene presente dos electrodos, un ánodo y un cátodo, en el primero el hidrógeno se disocia en protones (conducidos a través de la membrana) y electrones (van a otro circuito, produciendo energía), todo esto de forma aislada gracias a una membrana. En el cátodo, el aire ingresa al sistema y con el catalizador los iones de H_2 y electrones generan agua como subproducto [9].

1.4.7 Reconversión energética del hidrógeno mediante energía solar

La energía solar es captada por el panel fotovoltaico generando electricidad, la cual, si es suficiente para abastecer la demanda de la instalación, operará de forma directa y todo el excedente se usará para obtener hidrógeno por medio del electrolizador. El electrolizador da como resultado hidrógeno gaseoso para luego ser almacenado en forma de gas. En el caso de que la energía suministrada por el sol no sea suficiente, entra en acción la pila de combustible que usa el hidrógeno almacenado para producir energía eléctrica. Esto es posible porque dicho componente consume hidrógeno y oxígeno del exterior para generar un suministro de electricidad constante, con lo que podría complementar de manera parcial o total la demanda de energía. El uso de energías renovables, como la energía solar, da como resultado hidrógeno verde puesto que se obtiene sin generar contaminación al ambiente. Los equipos que hacen posible este proceso se visualizan en la figura 1.2 y se detallan a continuación:

- **Panel Solar:** Es un equipo que permite generar calor o electricidad según el tipo de panel. Existen dos tipos de paneles solares: colectores solares y paneles fotovoltaicos los cuales generan agua caliente y electricidad respectivamente. Los paneles fotovoltaicos generan electricidad debido a sus células fotovoltaicas las cuales al ser expuestas a la radiación dan como resultado un efecto fotovoltaico para producir cargas positivas y negativas dando lugar a una corriente eléctrica continua (DC) [10].
- **Regulador de carga:** Permite regular el flujo de energía desde los paneles solares, existen dos tipos de reguladores: PWM y MPPT los cuales se diferencian respecto a la potencia en su salida. El primero permite obtener la máxima potencia posible de los paneles solares mientras que el PWM tiene la misma potencia tanto en la entrada como en la salida [11].
- **Electrolizador:** Consiste en un equipo capaz de generar hidrógeno mediante el agua y un proceso químico conocido como electrólisis, este proceso permite separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno mediante una corriente continua (DC) la cual fluye por los electrodos en el agua [6].

- **Bombona de Hidrógeno:** Tal como su nombre indica, consiste en un envase capaz de almacenar el hidrógeno gaseoso generado por el electrolizador para luego ser enviado a una pila de combustible donde finalmente se da la conversión en electricidad. Cabe recalcar que la densidad por unidad de volumen del hidrógeno hace difícil almacenar este elemento [8].
- **Pila de Hidrógeno:** Cumple el mismo funcionamiento de una pila acumuladora, en este caso la pila se va cargando a medida que recibe hidrógeno y en combinación con el oxígeno da como resultado electricidad en forma continua (DC) por lo cual se requiere de un inversor para obtener energía en corriente alterna (AC) y energizar las viviendas [9].
- **Inversor DC-AC:** Es un equipo capaz de convertir la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). Cabe recalcar que las viviendas se energizan con corriente alterna (AC) para el funcionamiento de los electrodomésticos por lo cual es un equipo muy usado en electrónica de potencia [10].

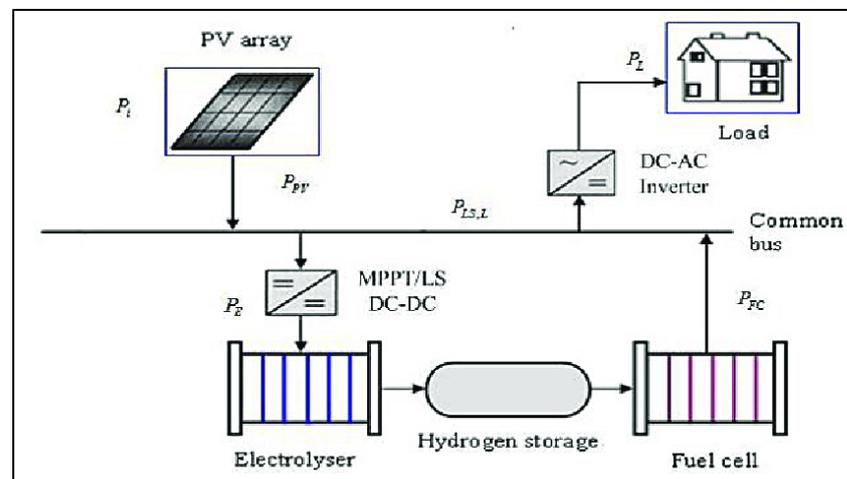


Figura 1.2 Reconversión energética de hidrógeno mediante energía solar [12]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para el diseño del sistema de reconversión energética del H₂, se identificó distintos subsistemas lo cual permite un mejor análisis por partes. También se realizó un modelo que permite relacionar cada subsistema y así obtener el sistema deseado el cual se representa con un diagrama de flujo en la figura 2.1. Además, se identificó los equipos con las características técnicas necesarios para el funcionamiento del sistema teniendo en cuenta las limitaciones económicas del usuario final.

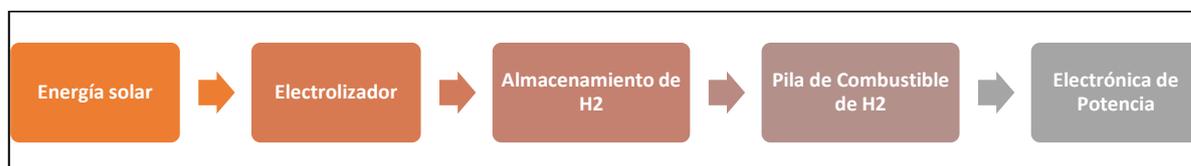


Figura 2.1 Diagrama de flujo del sistema

2.1 Dimensionamiento de los equipos del sistema

2.1.1 Dimensionamiento de la carga

Las viviendas rurales no tienen muchos electrodomésticos por lo cual hay una diferencia significativa respecto al consumo energético de las viviendas urbanas. Además, en la figura 2.2 se evidencia que la mayor cantidad de clientes en el sector energético corresponde a las viviendas por lo cual es un amplio mercado.

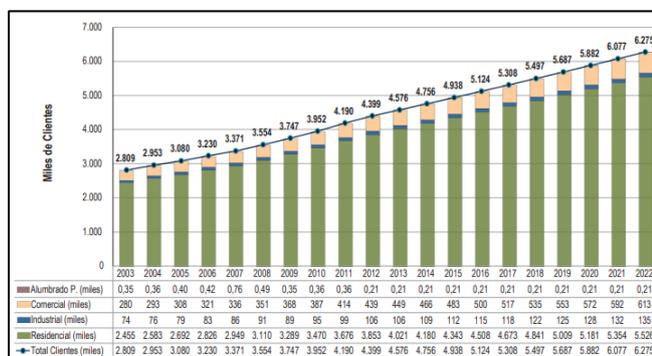


Figura 2.2 Evolución del consumo de energía eléctrica [13]

Para el desarrollo del proyecto se necesita conocer la demanda energética diaria en las viviendas rurales para dimensionar los equipos que conforman el sistema. Primero se calculó el consumo energético durante el día, para ello se presenta la tabla 2.1 en donde se especifica el consumo diario de cada electrodoméstico que se utilizan comúnmente en estas viviendas.

Tabla 2.1 Consumo de los electrodomésticos durante el día [14]

Artefactos eléctricos	Potencia [kW]	Tiempo de uso en el día [h]	Cantidad de equipos	Consumo diario [kWh]
Televisor	0.100	3.00	1	0.300
Plancha	1.000	0.17	1	0.170
Licuada	0.375	0.10	1	0.038
Ventilador	0.090	3.00	1	0.270
Refrigerador	0.350	8.00	1	2.800
Iluminación	0.011	5.00	4	0.220
Total				3.798

De igual forma se obtiene la demanda energética durante la noche, esta potencia será suministrada por la pila de combustible a partir del hidrógeno generado por el electrolizador. Cabe recalcar que en la noche se tiene menos consumo energético puesto que los electrodomésticos se usan menos tiempo. El consumo durante la noche se detalla en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Consumo de los electrodomésticos durante la noche [14]

Artefactos eléctricos	Potencia [kW]	Tiempo de uso en la noche [h]	Cantidad de equipos	Consumo diario [kWh]
Televisor	0.100	2.00	1	0.200
Licuada	0.375	0.10	1	0.038
Ventilador	0.090	2.00	1	0.180
Refrigerador	0.350	4.00	1	1.400
Iluminación	0.011	3.00	4	0.165
Total				1.983

Una vez conocida la demanda diaria se relaciona dicho consumo con la cantidad de hidrógeno necesario. Se conoce que se necesitan aproximadamente 60 kWh para producir 1 Kg [15]. Cabe recalcar que el hidrógeno por sí solo no puede generar electricidad, por ello es necesario de una pila de combustible. Para obtener la mayor eficiencia de la pila de combustible se requiere del 50% (11.5 lpm) del caudal máximo, esto se observa en el capítulo 3. Considerando que la pila debe funcionar 4 horas durante la noche se obtiene lo siguiente:

$$\frac{11.5 \text{ L}}{\text{min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot 4\text{h} = \mathbf{2,760 \text{ L H}_2}$$

$$2,760 \text{ L} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ L}} \cdot \frac{0.0899 \text{ Kg}}{1 \text{ m}^3} = \mathbf{0.25 \text{ Kg H}_2}$$

Del cálculo anterior se obtuvo que se requieren 0.25 kg de hidrógeno diariamente para abastecer la vivienda durante la noche. Ahora se obtiene cuanta energía se necesita para producir dicha cantidad de hidrógeno durante el día, recordando que 60 kWh permite producir 1 kg de hidrógeno entonces se obtiene lo siguiente.

$$\frac{60 \text{ kWh}}{1 \text{ kg H}_2} \cdot 0.25 \text{ kg H}_2 = \mathbf{15 \text{ kWh}}$$

Por tanto, se necesitarían 15 kWh al día para producir 0.25 kg de hidrógeno. Se suma el consumo diario durante el día de la tabla 2.1 y el resultado anterior.

$$3.798 \text{ kWh} + 15 \text{ kWh} = \mathbf{18.798 \text{ kWh}}$$

En resumen, el sistema fotovoltaico debe ser capaz de cubrir la demanda energética de 18.798 kWh al día para energizar la vivienda y al electrolizador el cual produce hidrógeno durante el día para luego ser consumido en la noche por la pila de combustible y abastecer de energía a la vivienda.

2.1.2 Dimensionamiento del panel fotovoltaico

Recordando que el proyecto está orientado a las viviendas rurales de Guayaquil, entonces es importante conocer las condiciones climáticas del sector. Uno de los datos más importantes a tener en cuenta es la irradiación solar, para ello nos ayudamos del programa PVsyst el cual cuenta con una amplia base de datos de las condiciones climáticas relacionadas a la energía solar. En la figura 2.3 se evidencia los niveles de irradiación diaria de cada mes.

Sitio Guayaquil (Ecuador)					
Fuente de datos <input type="text" value="Meteonorm 8.1 (2016-2021), Sat=100%"/>					
	Irradiación horizontal global	Temperatura	Velocidad del viento	Turbidez Linke	Humedad relativa
	kWh/m ² /día	°C	m/s	[-]	%
Enero	4.70	26.5	1.30	4.365	71.0
Febrero	4.63	26.4	1.00	4.189	77.1
Marzo	4.96	26.9	1.09	4.245	75.2
Abril	5.11	26.6	1.19	4.701	75.4
Mayo	4.46	26.3	1.49	4.629	72.5
Junio	4.05	24.7	2.09	4.158	74.0
Julio	3.84	24.4	2.39	3.937	71.9
Agosto	3.84	24.0	2.80	4.161	71.4
Septiembre	3.98	24.0	2.90	4.690	70.8
Octubre	3.43	24.4	2.80	4.871	69.9
Noviembre	3.81	24.6	2.70	5.006	68.9
Diciembre	4.43	26.4	2.19	5.275	64.8
Año	4.27	25.4	2.0	4.519	71.9

Irradiación horizontal global variabilidad año a año **6.8%**

Figura 2.3 Nivel de irradiación solar en Guayaquil

En los datos de la figura 2.3 se puede observar el nivel de irradiación promedio en Guayaquil, sin embargo, el proyecto se dimensiona con el menor nivel de irradiación el cual corresponde al mes de Octubre con un valor de 3.43 kWh/m² al día. También es importante tener en cuenta la inclinación de los paneles solares para obtener la mayor eficiencia posible. Guayaquil está muy cerca de la línea del Ecuador lo cual se evidencia en su latitud de 2°15'S, esta información es importante para determinar la inclinación de los paneles con la ecuación 2.1.

$$\beta = 3.7 + 0.69 \cdot L \quad (2.1)$$

Donde:

L: Latitud del lugar.

β : Inclinación óptima [°].

Reemplazando la latitud en la ecuación 2.1, se obtiene el ángulo de inclinación.

$$\beta = 3.7 + 0.69(2.15)$$

$$\beta = 5.18^\circ$$

Luego se determinó las horas solar pico, sin embargo, se debe tener en cuenta un factor de corrección que depende del ángulo de inclinación obtenido y de la latitud del lugar. Según los datos del apéndice A el factor de corrección es de **1.02**. Luego se utiliza la ecuación 2.2 para calcular las horas solar pico.

$$HSP = 1.02 \cdot \left(\frac{I_{rr}}{1 \text{ kW/m}^2} \right) \quad (2.2)$$

Donde:

HSP: Horas Solar Pico [h].

I_{rr} : Irradiación solar [kWh/m²]

Reemplazando el menor nivel de irradiación solar, el cual es 3.43 kWh/m², y teniendo en cuenta el factor de corrección de 1.02 se obtiene:

$$HSP = 1.02 \left(\frac{3.43 \text{ kWh/m}^2}{1 \text{ kW/m}^2} \right)$$

$$\mathbf{HSP = 3.50 \text{ h}}$$

Una vez conocido los datos del clima, es importante definir el tipo de panel a utilizar. Los paneles fotovoltaicos pueden ser monocristalinos o policristalinos, ambos se diferencian en el rendimiento para producir energía. El panel monocristalino genera mayor energía ya que se usa silicio de alta pureza para su fabricación a diferencia del policristalino donde el silicio tiene mayor impureza.

En la tabla 2.3 se tiene la comparación de distintos paneles solares. En este caso se eligió el panel monocristalino **JAM72S20-465/MR** de la figura 2.4, cuyos parámetros más importantes se evidencian en la tabla 2.4. La hoja de datos de este equipo se encuentra adjunto en el apéndice B de este documento.

Tabla 2.3 Comparación de parámetros de paneles solares

	JAM72S20-465/MR	LR5-66HP-510M	JKM475N-60HL4
V_{oc}	50.15	45.85	42.54
V_{mp}	42.43	38.68	35.21
I_{sc}	11.49	14.05	14.23
I_{mp}	10.96	10.55	10.79
P_{mp}	465.0	510	475
Eficiencia	21.0	21.5	22.01

Tabla 2.4 Parámetros del panel fotovoltaico JAM72S20-465/MR [16]

V_{oc}	50.15 V
V_{mp}	42.43 V
I_{sc}	11.49 A
I_{mp}	10.96 A
P_{mp}	465.0 W

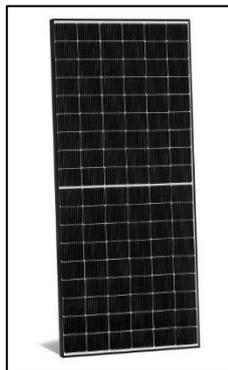


Figura 2.4 Panel solar JAM72S20-465/MR [16]

Una vez definido el panel fotovoltaico a utilizar, se procedió a realizar el cálculo para determinar el número de paneles necesarios con la ecuación 2.3.

$$N_t = \frac{E}{W_p \cdot HSP} \quad (2.3)$$

Donde:

N_t: Número de paneles

HSP: Horas solar pico [h]

E: Consumo de energía diario [kWh]

W_p: Potencia de cada panel solar [kW]

Tomando en cuenta que el mínimo número de horas solar pico (HSP) es de 3.50 horas y la potencia pico de cada panel fotovoltaico es de 465 W, reemplazando los datos conocidos en la ecuación 2.3 se obtiene el número de paneles solares.

$$N_t = \frac{18.798 \text{ kWh}}{(0.465 \text{ kW}) \cdot (3.50 \text{ h})} = \mathbf{12 \text{ paneles}}$$

Para evitar trabajar con altos voltajes y altas corrientes se realiza una conexión mixta en los paneles fotovoltaicos de tal forma que la corriente y voltaje de entrada al regulador de carga no sean muy elevados. En este caso se opta por tener 6 ramas en paralelo donde cada rama tiene 2 paneles en serie.

2.1.3 Dimensionamiento del inversor regulador

Hay 2 tipos de reguladores de carga, estos son MPPT y PWM. El primero permite extraer el máximo de potencia de los paneles mientras que los PWM tienen una pérdida de potencia de 25 a 30%. Además, se debe tener en cuenta el voltaje del electrolizador y la pila de combustible a usar, en este caso dichos equipos trabajan a 48 V. Luego se debe tener en cuenta la potencia que entregan los paneles.

$$P_t = N_t \cdot W_p \quad (2.4)$$

Donde:

N_t: Número de paneles.

P_t: Potencia total de los paneles [kW].

W_p: Potencia de cada panel solar [kW].

Reemplazando los datos conocidos en la ecuación 2.4 se obtiene lo siguiente:

$$P_t = 12 \cdot 0.465 = \mathbf{5.58 \text{ kW}}$$

El valor obtenido corresponde a la potencia de los paneles cuando la irradiancia es de 1 kW/m^2 , cabe recalcar que las condiciones climáticas no llegan a dicho valor. Las condiciones climáticas llegan a un valor máximo entre 0.8 a 0.9 kW/m^2 , en esas condiciones la potencia fotovoltaica máxima no supera los 5 kW . Por tanto, se eligió el **inversor cargador Growatt SPF 6000T DVM** el cual soporta una potencia máxima fotovoltaica de hasta 5 kW .



Figura 2.5 Inversor Cargador Growatt SPF 6000T DVM [17]

2.1.4 Dimensionamiento del electrolizador

La tecnología PEM es la más desarrollada en comparación al alcalino y óxido sólido, por lo cual es la más común en los electrolizadores y en las pilas de combustible. Ya se determinó que se necesita $2,760$ litros de hidrógeno al día. Considerando las horas solar pico mínima obtenida anteriormente (3.50 h), se obtuvo la tasa de producción mínima que debe tener el electrolizador.

$$\frac{2,760 \text{ L H}_2}{3.5 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = \mathbf{13.14 \text{ L/min H}_2}$$

Se eligió el electrolizador **PEM CH-5000** de la figura 2.6. Su tasa de producción de hidrógeno es de 5 L/min , al usar 3 de estos equipos conectados en paralelo se obtendrían 15 L/min lo cual satisface el valor anterior.



Figura 2.6 Electrolizador PEM CH-5000 [18]

También es importante obtener el caudal de agua necesaria para producir 0.25 kg de hidrógeno durante las 3.5 horas solar pico.

$$\frac{250 \text{ g H}_2}{3.5 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot \frac{36.03 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ H}_2\text{O}}{4.03 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ H}_2} = \mathbf{10.64 \text{ g/min H}_2\text{O}}$$

2.1.5 Dimensionamiento de la bombona de hidrógeno

Para el almacenamiento se tendrá en cuenta que pueda suministrar la cantidad suficiente de H₂, con una cantidad de volumen, peso, coste y seguridad, acorde a normativas. Estos tanques deben tener un revestimiento en su interior, una malla de nylon, con varias capas de fibra de grafito y capa de reforzamiento epoxi. Para determinar la dimensión de la bombona de hidrógeno se utiliza la ecuación de los gases ideales la cual se expresa con la ecuación 2.5.

$$P \cdot V = R \cdot T \cdot n \quad (2.5)$$

Donde:

V: Volumen del gas [m³].

P: Presión del gas [Pascal].

T: Temperatura del gas [K].

n: Cantidad de moles del gas [mol].

R: Constante universal de gases ideales= 8.314472 [J/mol·K].

Los demás datos son conocidos, por tanto, se despeja la variable del volumen.

$$V = \frac{R \cdot T \cdot n}{P}$$
$$V = \frac{8.314472 \cdot (298) \cdot \left(\frac{250}{1.00797}\right)}{101325}$$
$$\mathbf{V = 6.06 \text{ m}^3}$$

Las bombonas de la figura 2.7 generalmente tienen un volumen de 8 m³, por tanto, con uno solo de esos recipientes se puede abastecer el sistema.



Figura 2.7 Bombonas de hidrógeno

2.1.6 Dimensionamiento de la pila de hidrógeno

La pila de combustible elegida es una de tipo PEM puesto que es la tecnología más desarrollada y por ello la más comercial. En este caso, la pila PEM elegida es la **H-2000** de la figura 2.8 ya que puede entregar hasta una potencia instantánea de 2 kW lo cual es suficiente para una vivienda rural durante la noche.



Figura 2.8 Pila de combustible H-2000 [19]

Las pilas de hidrógeno entregan voltaje en función de la demanda, es decir, su tensión no es constante como otras fuentes de voltaje. La pila H-2000 seleccionada tiene un rango de voltaje de 24 a 43 V, por tanto, el convertidor elevador a 48 V de la figura 2.9 es ideal para garantizar un voltaje constante.

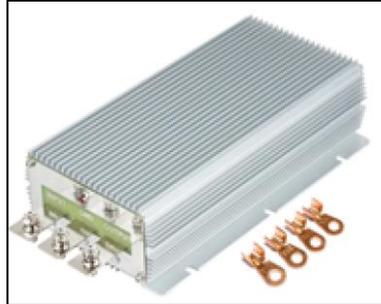


Figura 2.9 Convertidor elevador

2.1.7 Dimensionamiento del sistema convencional

El proyecto esta orienta al diseño de un sistema basado en hidrógeno, sin embargo, se lo debe comparar con un sistema convencional para determinar la viabilidad económica y eficiencia del mismo. Se utiliza un sistema ya dimensionado por una empresa especializada en sistemas fotovoltaicos, este sistema está formado por paneles fotovoltaicos, inversor regulador, batería de litio y otros elementos. El sistema tiene una producción media diaria de 12.15 kWh [20]. Por tanto, es ideal para satisfacer la demanda energética de la vivienda.



Figura 2.10 Sistema convencional [20]

2.2 Simulación del sistema de hidrógeno

Se realizó la simulación del sistema con las herramientas que proporciona MATLAB-SIMULINK, también se diseñó otros circuitos necesarios para el sistema. En la figura 2.11 se evidencia el sistema simulado en SIMULINK. En la entrada del panel solar se tiene la irradiancia y la temperatura ambiente mientras que la máxima potencia del arreglo de paneles se extrae mediante el inversor regulador MPPT. El regulador entrega una tensión de 48 V a la batería, pero en este caso se reemplaza la batería por un electrolizador el cual genera hidrógeno para ser almacenado en una bombona. En la noche la pila de combustible consume el hidrógeno almacenado para abastecer de energía la vivienda, cabe recalcar que a la salida de la pila se tiene un convertidor elevador a 48 V para que dicha tensión ingrese en el inversor y obtener corriente alterna (AC). Cabe recalcar que se tiene un bloque de conmutación de tal forma que en el día el regulador se conecta al electrolizador y en la noche se conecta a la pila de combustible.

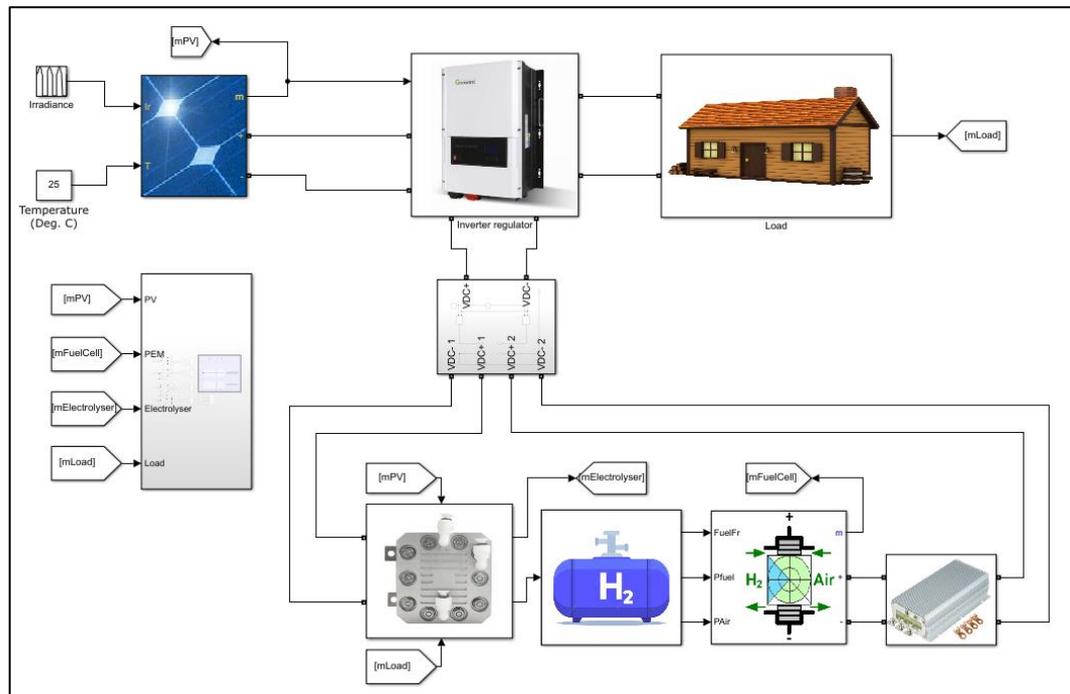


Figura 2.11 Simulación del sistema basado en hidrógeno

2.2.1 Simulación de la carga

Los interruptores de esta figura 2.12 permiten simular cuando una carga se activa o desactiva permitiendo simular distintos escenarios. Además, cada interruptor representa una determinada carga tales como iluminación, refrigeradora, televisión, entre otros los cuales se observan en la misma figura. También se incluyen gráficas para observar el voltaje y corriente de la carga mientras que los displays muestran su valor eficaz respectivamente.

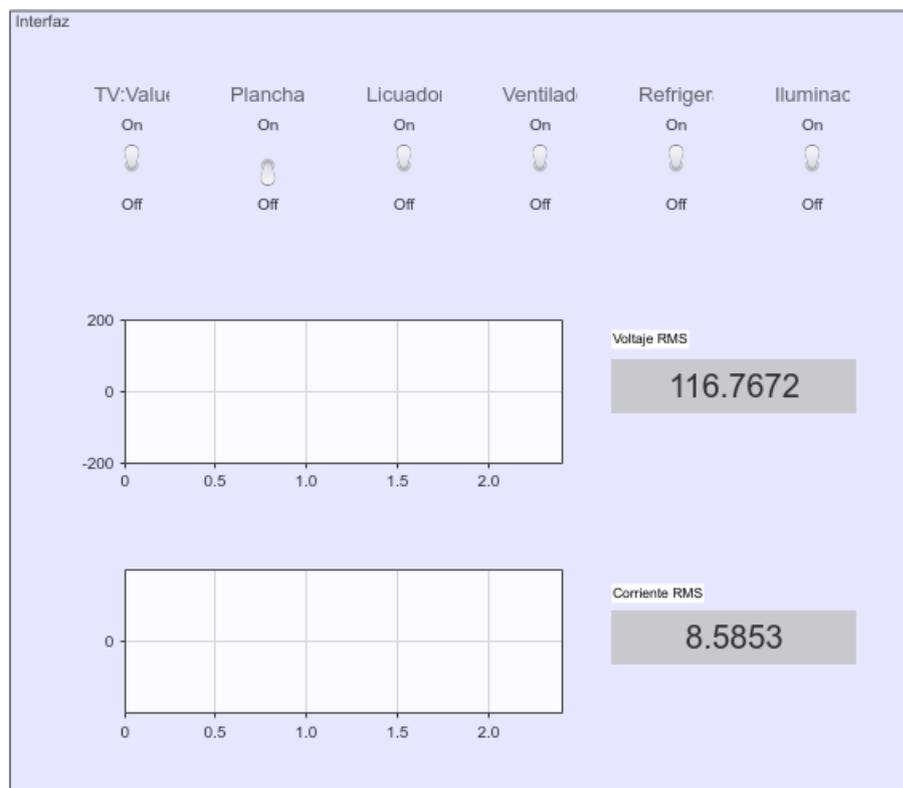


Figura 2.12 Interfaz de usuario

En la figura 2.13 se simula la carga con un conjunto de resistencias las cuales se conectan en serie con un interruptor el cual se activa o desactiva según la interfaz de usuario de la figura 2.12. Esto permite conectar o desconectar las cargas en cualquier instante de tiempo y simular distintos escenarios.

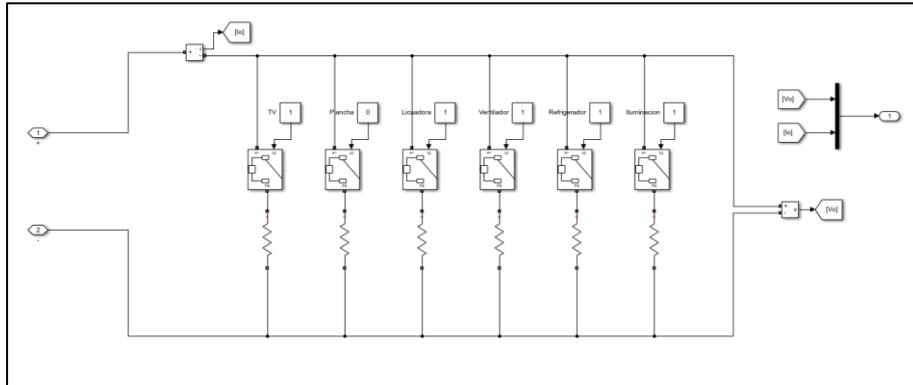


Figura 2.13 Simulación de la carga

2.2.2 Simulación del panel fotovoltaico

El circuito de los paneles fotovoltaicos se representa con el modelo de SIMULINK en la figura 2.14. Este circuito tiene como entrada una fuente de corriente la cual depende de la irradiancia y la temperatura, esto es lo que permite generar corriente continua (DC) durante el día según la radiación solar.

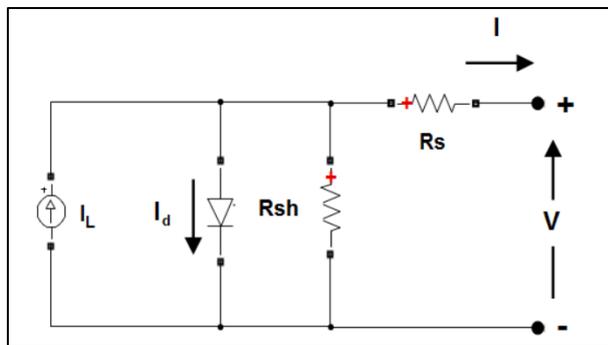


Figura 2.14 Circuito eléctrico de panel solar [21]

Del circuito anterior se pueden obtener la siguiente ecuación:

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V_d}{\frac{k \cdot T}{q} \cdot nI \cdot N_{cell}} \right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

Donde:

Ncell: Celdas en serie.

V_d: Voltaje del diodo [V].

I_d : Corriente del diodo [A].

T : Temperatura de la celda [K].

q : Carga de protones= $1.6022 \cdot 10^{-19}$ [C].

I_0 : Corriente de saturación del diodo [A].

k : Constante de Boltzman= $1.3806 \cdot 10^{-23}$ [J/K].

nI : Factor de idealidad del diodo (aproximado a 1).

Dado el panel solar se puede configurar los parámetros en el bloque de SIMULINK de acuerdo a los valores de la hoja de datos del panel fotovoltaico seleccionado. Dicha configuración se evidencia en la figura 2.15 que se muestra a continuación.

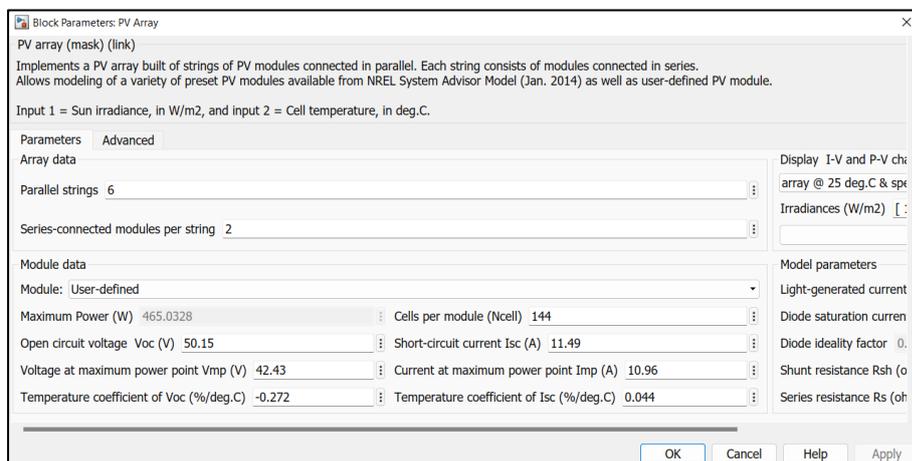


Figura 2.15 Configuración del bloque del panel solar

2.2.3 Simulación del inversor regulador

Este equipo está conformado por el regulador de carga MPPT y el inversor SPWM, por tanto, se realiza la simulación de ambos equipos. Para el regulador MPPT se utiliza el algoritmo de perturbación y observación (P&O) para obtener la máxima potencia de los paneles, así mismo, se diseña un convertidor reductor a 48 V para el electrolizador. El regulador de carga diseñado se observa en la figura 2.16 y el código del algoritmo P&O se encuentra en el apéndice H del documento.

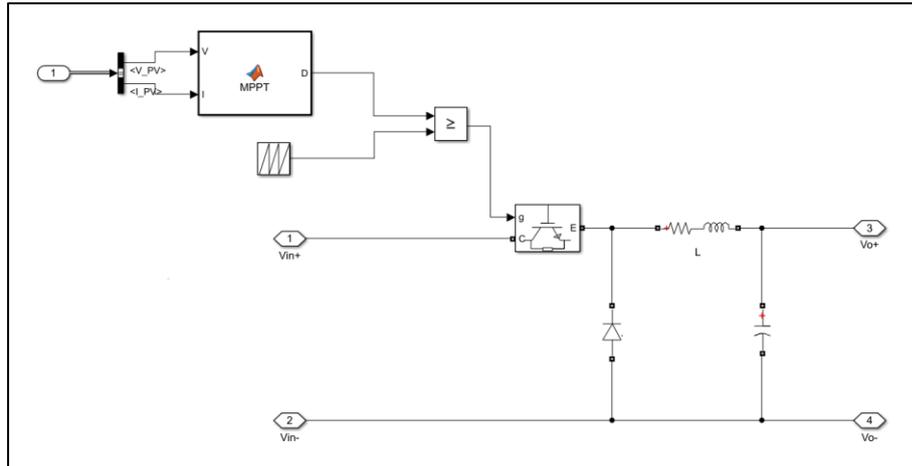


Figura 2.16 Modelo del convertidor reductor con MPPT

A continuación, se detallan los cálculos para el diseño del convertidor reductor de la figura 2.15. Los datos conocidos son:

$$V_{in} = 84 \text{ V}$$

$$V_o = 48 \text{ V}$$

$$f_{sw} = 5 \text{ kHz}$$

Por tanto, se obtiene:

$$I_{ripple} = 0.1 \cdot \frac{2k}{48}$$

$$I_{ripple} = 4.17 \text{ A}$$

$$V_{ripple} = 0.01 \cdot 48$$

$$V_{ripple} = 0.48 \text{ V}$$

$$L = \frac{V_o \cdot (V_{in} - V_o)}{f_{sw} \cdot I_{ripple} \cdot V_{in}} \quad (2.7)$$

$$L = \frac{48 \cdot (84 - 48)}{5k \cdot 4.17 \cdot 84}$$

$$L = 986.63 \text{ uH}$$

Donde:

L: Inductancia [uH]

V_o: Voltaje de salida [V].

V_{in}: Voltaje de entrada [V].

I_{ripple}: Corriente de rizado [A].

f_{sw}: Frecuencia de conmutación [kHz].

$$C = \frac{I_{\text{ripple}}}{8 \cdot f_{\text{sw}} \cdot V_{\text{ripple}}} \quad (2.8)$$

$$C = \frac{4.17}{8 \cdot 5k \cdot 0.48}$$

$$C = 0.22 \text{ mF}$$

Donde:

C: Capacitancia [mF].

V_{ripple}: Voltaje de rizado [V].

I_{ripple}: Corriente de rizado [A].

f_{sw}: Frecuencia de conmutación [kHz].

El regulador MPPT entrega un voltaje de 48V, por tanto, se diseña un circuito convertidor elevador a 180 V para obtener en la entrada del inversor una tensión de 180 V y con ello realizar la conmutación y en la salida del inversor obtener una señal AC cuyo valor máximo y mínimo es de 170V y -170V respectivamente.

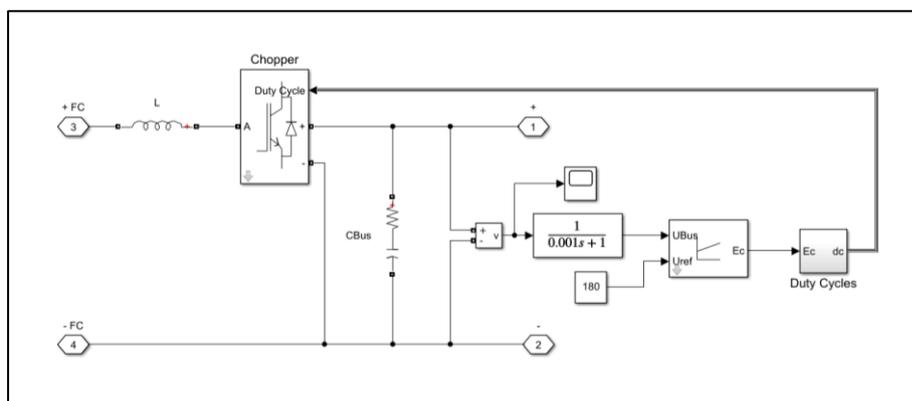


Figura 2.17 Modelo del convertidor elevador

Cabe recalcar que el circuito de la figura anterior corresponde a un modelo de SIMULINK por lo cual se utilizó el controlador que viene por defecto y se realizó los respectivos cálculos para determinar el valor tanto del capacitor como del inductor. Los datos conocidos son:

$$V_{in} = 48 \text{ V}$$

$$V_o = 180 \text{ V}$$

$$f_{sw} = 25 \text{ kHz}$$

Por tanto, se obtiene:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} \quad (2.9)$$

$$D = 1 - \frac{48}{180}$$

$$\mathbf{D = 0.73}$$

Donde:

D: Ciclo de trabajo.

V_o: Voltaje de salida [V].

V_{in}: Voltaje de entrada [V].

$$\Delta I = 0.3 \frac{V_o}{R} \cdot \frac{V_o}{V_{in}} \quad (2.10)$$

$$\Delta I = 0.3 \cdot 9 \cdot \frac{180}{48}$$

$$\mathbf{\Delta I = 10.125 \text{ A}}$$

Donde:

V_o: Voltaje de salida [V].

V_{in}: Voltaje de entrada [V].

ΔI: Variación de corriente [A].

$$L = \frac{V_{in}(V_o - V_{in})}{\Delta I \cdot f_{sw} \cdot V_o} \quad (2.11)$$

$$L = \frac{48(180-48)}{10.125 \cdot 25k \cdot 180}$$

L = 139 uH

Donde:

L: Inductancia [uH].

V_o: Voltaje de salida [V].

V_{in}: Voltaje de entrada [V].

ΔI: Variación de corriente [A].

f_{sw}: Frecuencia de conmutación [kW].

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V \cdot f_{sw}} \quad (2.12)$$

$$C = \frac{9 \cdot 0.73}{160m \cdot 25k}$$

C = 1.64 mF

Donde:

D: Ciclo de trabajo.

C: Capacitancia [mF].

I_o: Corriente de salida [A].

ΔV: Variación de voltaje [V].

f_{sw}: Frecuencia de conmutación [kW].

El inversor de la figura 2.18 tiene como objetivo transformar la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). Se observa que los transistores operan en la zona de saturación y corte, es decir, funcionan como interruptores los cuales conmutan según la señal de control. Además, la señal de control de los transistores está dada por el controlador PI el cual permite obtener un voltaje de 120 V_{rms}.

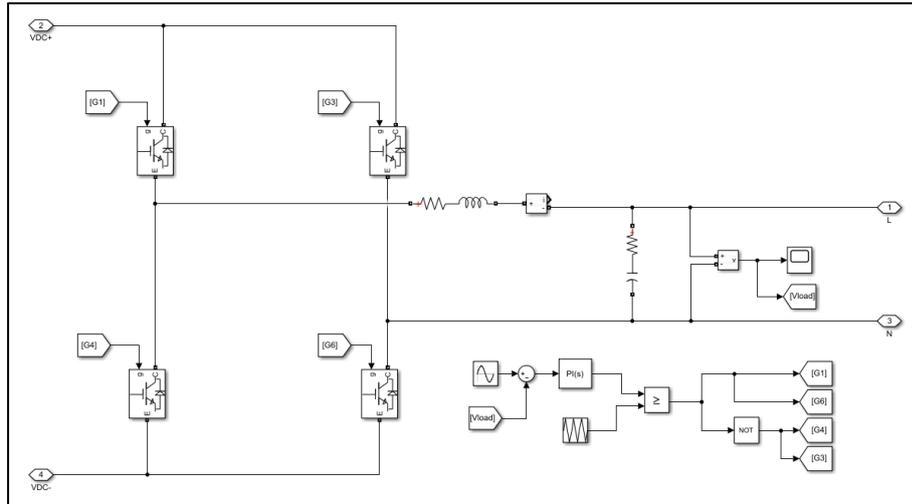


Figura 2.18 Modelo del inversor SPWM

Para obtener la señal sinusoidal tanto en el voltaje como en la corriente se utiliza un filtro RLC de tal forma que se pueda suavizar la señal resultante del inversor. Los datos conocidos son:

$$V_{in} = 180 \text{ V}$$

$$V_o = 120 \cdot \sqrt{2} \text{ V}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$f_{sw} = 10 \text{ KHz}$$

Por tanto, se obtiene:

$$f_{corte} = \frac{10 \cdot f + \frac{f_{sw}}{10}}{2} \quad (2.13)$$

$$f_{corte} = \frac{600 + \frac{10 \text{ k}}{10}}{2}$$

$$f_{corte} = 800 \text{ Hz}$$

Donde:

f_{corte} : Frecuencia de corte del filtro [Hz].

f : Frecuencia de salida del inversor [Hz].

f_{sw} : Frecuencia de la señal moduladora [kHz].

$$L=1 \text{ mH}$$

$$C = \frac{1}{(2\pi f_{\text{corte}})^2 \cdot L} \quad (2.14)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi f_{\text{corte}})^2 \cdot L}$$

$$C = \frac{1}{(2\pi \cdot 800)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}$$

$$C = 39.58 \text{ uF}$$

Donde:

L: Inductancia [mH].

C: Capacitancia [uF].

f_{corte}: Frecuencia de corte del filtro [Hz].

Para garantizar en la salida una señal de 120 V_{rms} se diseña un controlador. Se implementan parámetros iniciales para determinar las constantes del controlador. Los parámetros iniciales son:

$$t = 200 \text{ [us]}$$

$$R_C = 3 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Por tanto, se obtiene:

$$K_p = \frac{C}{t} \quad (2.15)$$

$$K_p = \frac{39.58 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 10^{-6}}$$

$$K_p = 0.20$$

Donde:

C: Capacitancia [uF].

t: Tiempo de respuesta [us].

K_p: Constante proporcional.

$$K_i = \frac{R_C}{t} \quad (2.16)$$

$$K_i = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-6}}$$

$$K_i = 15$$

Donde:

R_C : Resistencia del capacitor [$m\Omega$].

t : Tiempo de respuesta [μs].

K_i : Constante integral.

2.2.4 Simulación del electrolizador

El electrolizador está compuesto por un electrodo de ánodo y cátodo separados por una membrana de polímero en el caso de los electrolizadores PEM. Esto se modela mediante un circuito eléctrico equivalente mostrado en la figura 2.19.

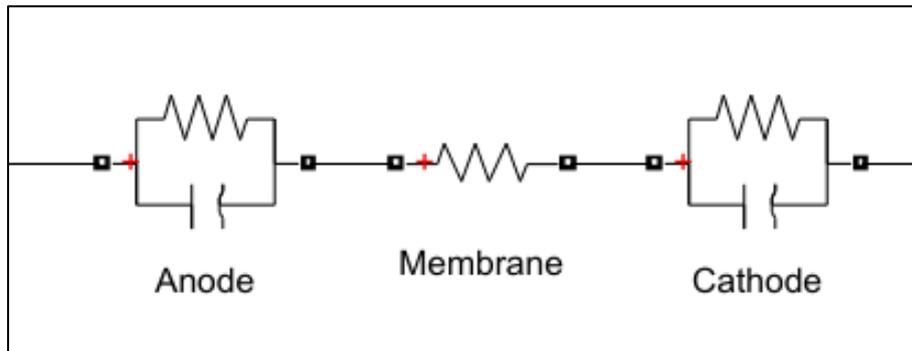


Figura 2.19 Modelo del electrolizador

2.2.5 Simulación de la bombona de hidrógeno

En el sistema anterior se obtuvo hidrógeno a partir del electrolisis del agua, por tanto, dicho hidrógeno debe ser almacenado para su posterior uso. Recordando que el hidrógeno está en su estado gaseoso, se optó por almacenarlo en dicho estado. El modelo matemático que permite describir el comportamiento de un gas real corresponde a la Ley de Gases Ideales representada en la ecuación 2.5 y también se representa en SIMULINK con la figura 2.20.

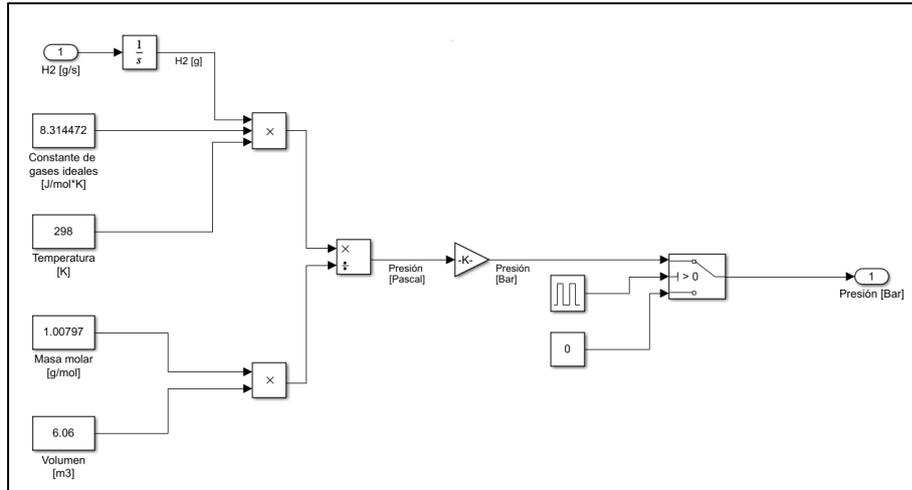


Figura 2.20 Modelo del sistema de almacenamiento

2.2.6 Simulación de la pila de hidrógeno

Existen distintos tipos de pila de combustible, por lo cual se debe elegir la más adecuada para el sistema. En este caso la herramienta de simulación MATLAB-SIMULINK ya cuenta con un bloque que representa esta pila de combustible. El modelo interno de dicho bloque se representa con la figura 2.21.

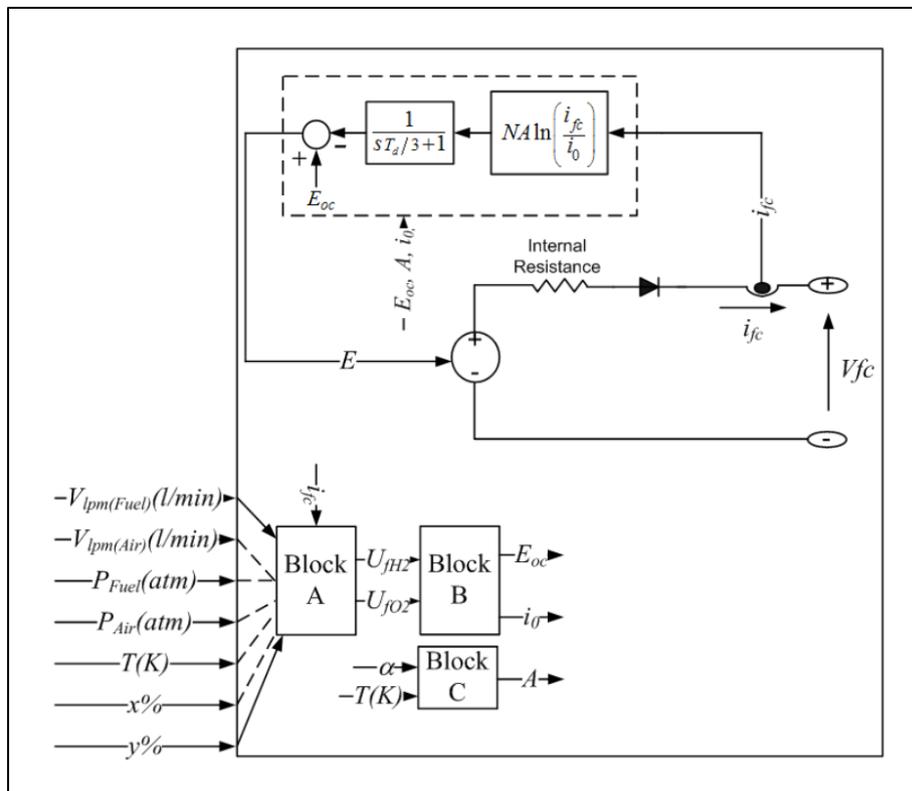


Figura 2.21 Modelo de la pila de hidrógeno [22]

El modelo anterior se puede representar mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_{oc} = K_c \cdot E_n \quad (2.17)$$

$$i_0 = \frac{z \cdot F \cdot k \cdot (P_{H_2} + P_{O_2}) \cdot \Delta v}{R \cdot h} e^{\frac{-\Delta G}{R \cdot T}} \quad (2.18)$$

$$A = \frac{R \cdot T}{z \cdot \alpha \cdot F} \quad (2.19)$$

Donde:

T: Temperatura [K].

E_n: Voltaje de Nernst.

A: Pendiente de Tafel

K_c: Constante de tensión.

P_{O₂}: Presión del oxígeno.

P_{H₂}: Presión del hidrógeno.

i₀: Corriente de intercambio [A]

E_{oc}: Voltaje de circuito abierto [V]

α: Coeficiente de transferencia de carga.

z: Cantidad de electrones intercambiados.

ΔG: Dimensión de la barrera de activación.

F: Constante de Faraday= 96,500 [C/mol].

h: Constante de Planck= 6.626·10⁻³⁴ [J·s].

k: Constante de Boltzman= 1.3806·10⁻²³ [J/K].

Δv: Factor de volumen de la barrera de activación.

R: Constante universal de gases ideales= 8.3145 [J/mol·K].

Otra ecuación importante son las ecuaciones 2.20 y 2.21 las cuales permiten relacionar el flujo de combustible en función de la presión:

$$U_{fH_2} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot N \cdot i_{fc}}{z \cdot F \cdot P_{fuel} \cdot V_{lpm(fuel)} \cdot X\%} \quad (2.20)$$

$$U_{fO_2} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot N \cdot i_{fc}}{2 \cdot z \cdot F \cdot P_{air} \cdot V_{lpm(air)} \cdot y\%} \quad (2.21)$$

Donde:

x: Porcentaje de hidrógeno en el combustible [%].

P_{fuel}: Presión de suministro de combustible [atm].

V_{lpm (combustible)}: Caudal de combustible [l/min].

U_{ffH₂}: Tasa de utilización de hidrógeno.

y: Porcentaje de oxígeno en el oxidante [%].

P_{aire}: Presión de suministro de aire [atm].

V_{lpm (aire)}: Caudal de aire [l/min].

U_{fO₂}: Tasa de utilización de hidrógeno.

N: Número de celdas.

Las ecuaciones 2.22 y 2.23 permitirán relacionar el comportamiento de la eficiencia con otros parámetros, esto será analizados en los resultados.

$$U_{ffH_2} = \frac{n_{nom} \cdot \Delta h^0 \cdot (H_2O(gas)) \cdot N}{z \cdot F \cdot V_{nom}} \quad (2.22)$$

$$O_{ffH_2} = \frac{60000 \cdot R \cdot T_{nom} \cdot N \cdot I_{nom}}{2 \cdot z \cdot F \cdot P_{air_{nom}} \cdot V_{lpm(air)_{nom}} \cdot 0.21} \quad (2.23)$$

Donde:

n_{nom}: Eficiencia nominal de la pila [%].

Δh⁰·(H₂O(gas)): 241.83 · 10³ [J/mol].

V_{nom}: Voltaje nominal [V].

I_{nom}: Corriente nominal [A].

V_{lpm(air)_{nom}}: Caudal de aire nominal [l/min].

P_{air_{nom}}: Presión de suministro de aire nominal [Pa].

T_{nom}: Temperatura nominal de funcionamiento [K].

El modelo de la figura 2.21 se representa mediante el bloque de la figura 2.22, dicho bloque ya viene dado en SIMULINK.

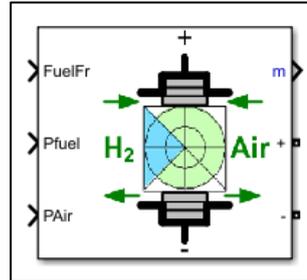


Figura 2.22 Bloque de la pila de hidrógeno

La configuración del bloque anterior se muestra en la figura 2.23, esta configuración está basada en la hoja de datos de la pila elegida anteriormente.

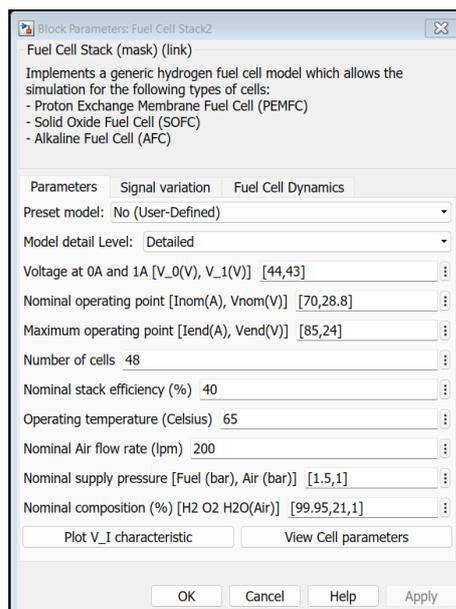


Figura 2.23 Configuración del bloque de la pila de hidrógeno

Recordando que a la salida de la pila de hidrógeno se necesita un convertidor a 48 V, entonces también se dimensiona dicho circuito. Los datos conocidos son:

$$V_{in} = 24 \text{ V}$$

$$V_o = 48 \text{ V}$$

$$f_{sw} = 25 \text{ kHz}$$

A continuación, se utiliza la ecuación 2.9 ya descrita anteriormente.

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{24}{48}$$

$$\mathbf{D = 0.50}$$

De igual forma se utiliza la ecuación 2.10.

$$\Delta I = 0.3 \cdot I_o \cdot \frac{V_o}{V_{in}}$$

$$\Delta I = 0.3 \cdot \frac{48}{2} \cdot \frac{48}{24}$$

$$\mathbf{\Delta I = 14.4 A}$$

Aquí se utiliza la ecuación 2.11.

$$L = \frac{V_{in}(V_o - V_{in})}{\Delta I \cdot f_{sw} \cdot V_o}$$

$$L = \frac{24(48-24)}{14.4 \cdot 25k \cdot 48}$$

$$\mathbf{L = 33.33 \mu H}$$

Finalmente se utiliza la ecuación 2.12.

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V \cdot f_{sw}}$$

$$C = \frac{24 \cdot 0.5}{160m \cdot 25k}$$

$$\mathbf{C = 3 mF}$$

2.3 Esquemático del sistema

El sistema contiene múltiples equipos los cuales se evidencian en la figura 2.24 y representa las conexiones entre los equipos del sistema.

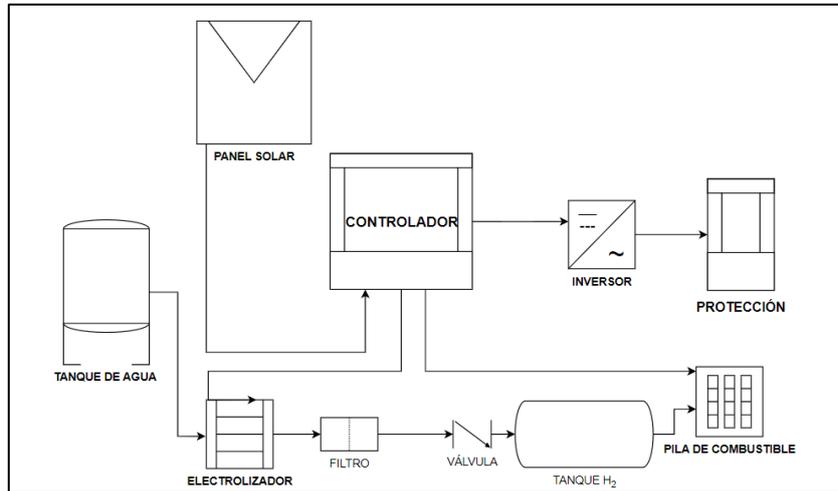


Figura 2.24 Esquemático del sistema

2.4 Diagrama de conexiones eléctricas y fluidicas

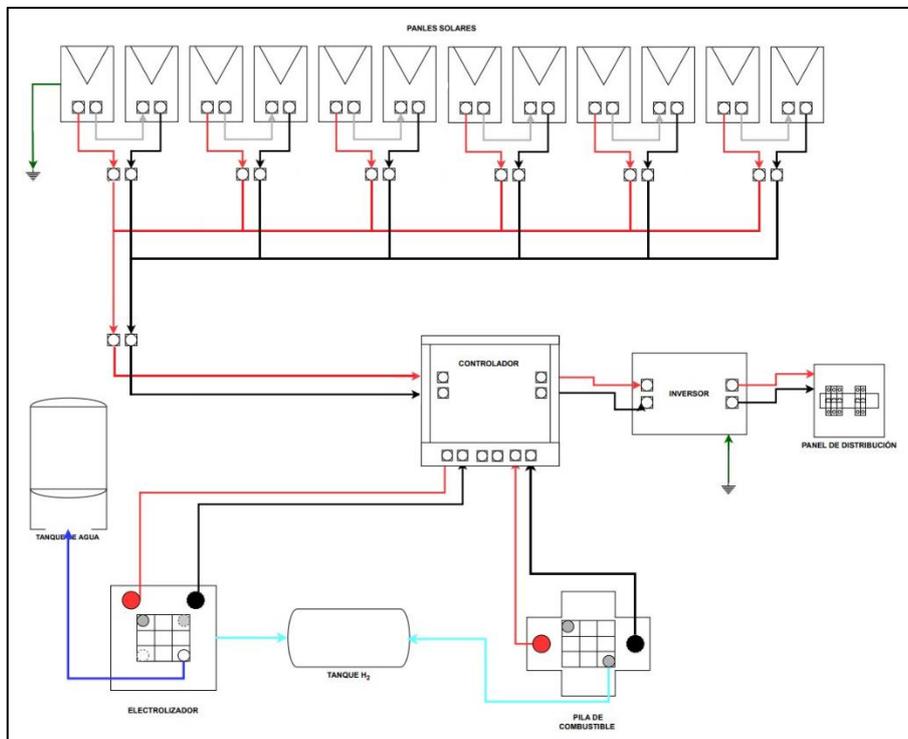


Figura 2.25 Diagrama de conexiones

Una representación del sistema de alimentación de energía se muestra en un modelo 3D de la figura 2.26. En la figura se evidencian los equipos ya mencionados anteriormente en el diseño, los nombres de cada equipo se detallan en la misma figura.

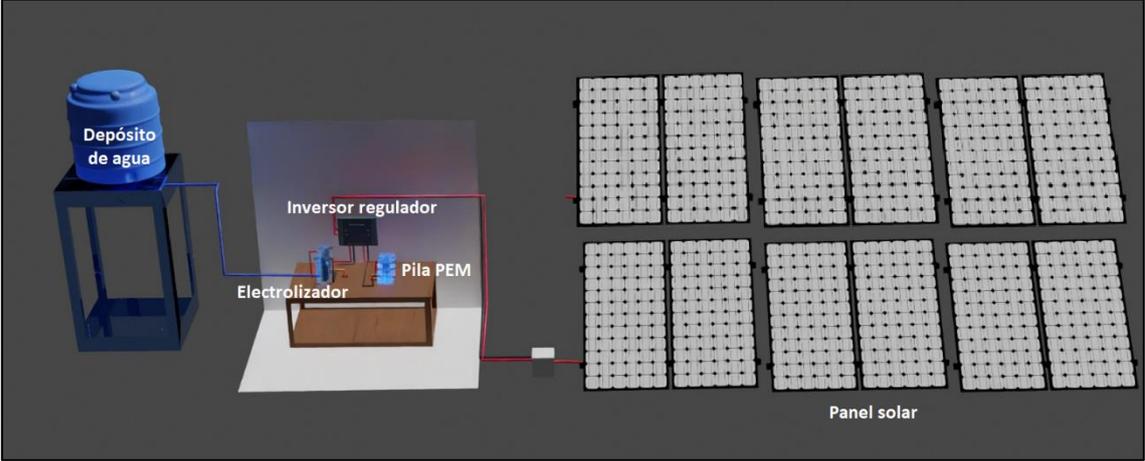


Figura 2.26 Sistema en 3D

La figura 2.27 permite observar de mejor forma la producción de hidrógeno mediante el electrolizador el cual recibe agua del tanque y también energía de los paneles solares. Este hidrógeno producido es almacenado en un recipiente que se encuentra alejado de las instalaciones eléctricas para tener mayor seguridad del sistema. Finalmente, la pila PEM consume el hidrógeno almacenado para abastecer de energía a la vivienda.

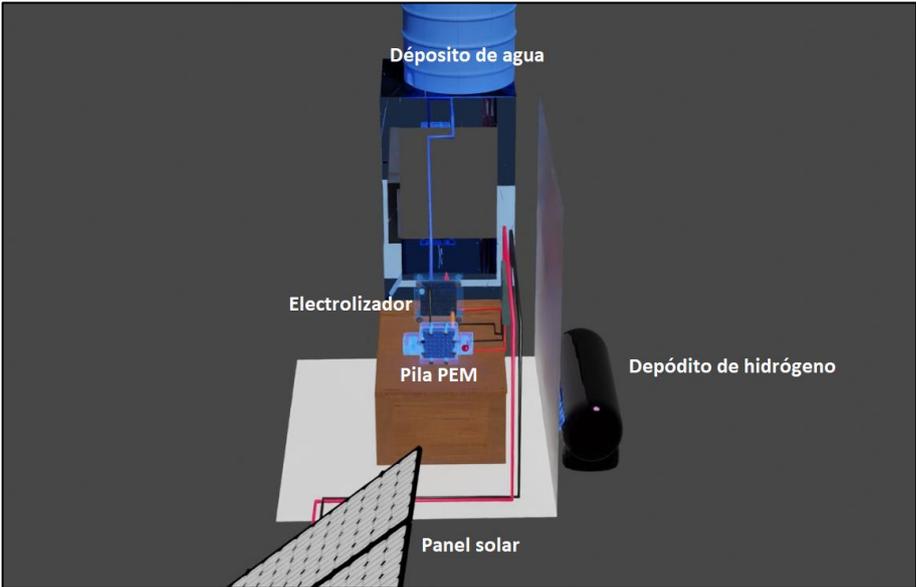


Figura 2.27 Producción de hidrógeno en 3D

2.5 Simulación del sistema convencional

El sistema basado en hidrógeno cumple su objetivo de energizar una vivienda mediante una pila de hidrógeno reemplazando las baterías que se usan comúnmente en los sistemas fotovoltaicos. Para verificar porque este tipo de sistemas no es usado en la actualidad se realiza una comparación con los sistemas convencionales. El sistema convencional se observa en la figura 2.28 y cuenta con paneles solares para recibir energía del sol, también tiene un inversor regulador para extraer la máxima potencia de los panes y transformarla en corriente alterna (AC) y finalmente cuenta con una batería de litio para guardar la energía excedente del día y usarla cuando sea necesario.

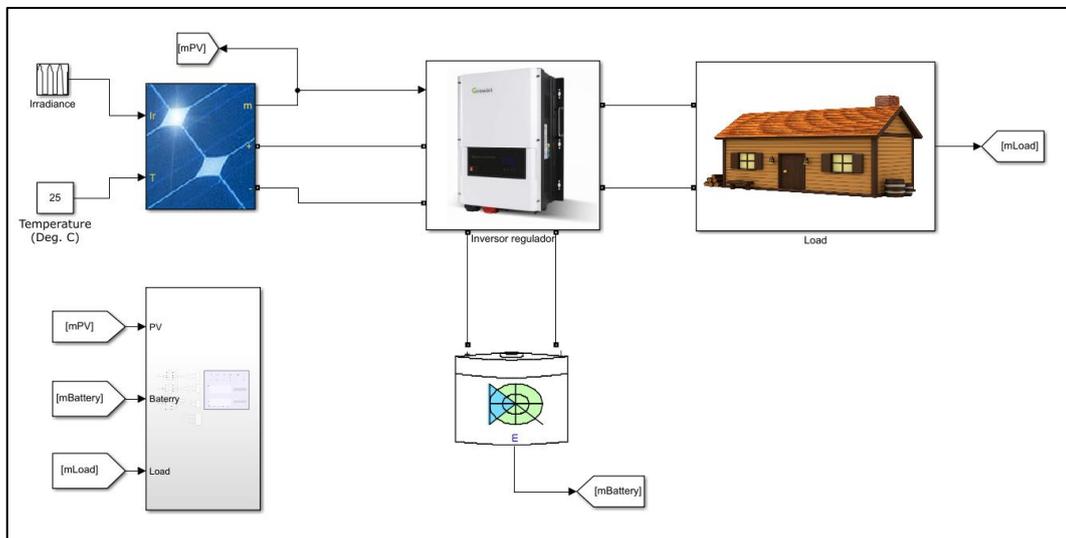


Figura 2.28 Simulación del sistema convencional

Las baterías de litio usadas en los sistemas convencionales se convierten en basura electrónica después de algunos años de uso, esta basura representa una gran contaminación para el ambiente generando un problema social. Por tanto, el sistema de hidrógeno busca reemplazar las baterías de litio por equipos que permiten generar hidrógeno y consumirlo como combustible para producir electricidad.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para obtener un comportamiento más real del sistema fotovoltaico en la generación de energía se utiliza la señal de irradiancia respecto al tiempo, este comportamiento se visualiza en la figura 3.1. Además, se observa que el tiempo de simulación tiene un valor máximo de 2.4 segundos debido a la complejidad computacional para simular un mayor periodo de tiempo, es decir, se debe tener en cuenta que 2.4 segundos representan 24 horas para todas las gráficas. Los primeros 1.2 segundos corresponden al día y los siguientes 1.2 segundos corresponden a la noche, esto se hizo para tener una mejor visión de las gráficas resultantes. La irradiancia, junto a la temperatura, corresponden a las señales de entradas de los paneles fotovoltaicos. Sin embargo, en este caso la temperatura se simula con un valor constante de 25 °C puesto que no varía de forma tan significativa como lo hace la irradiancia.

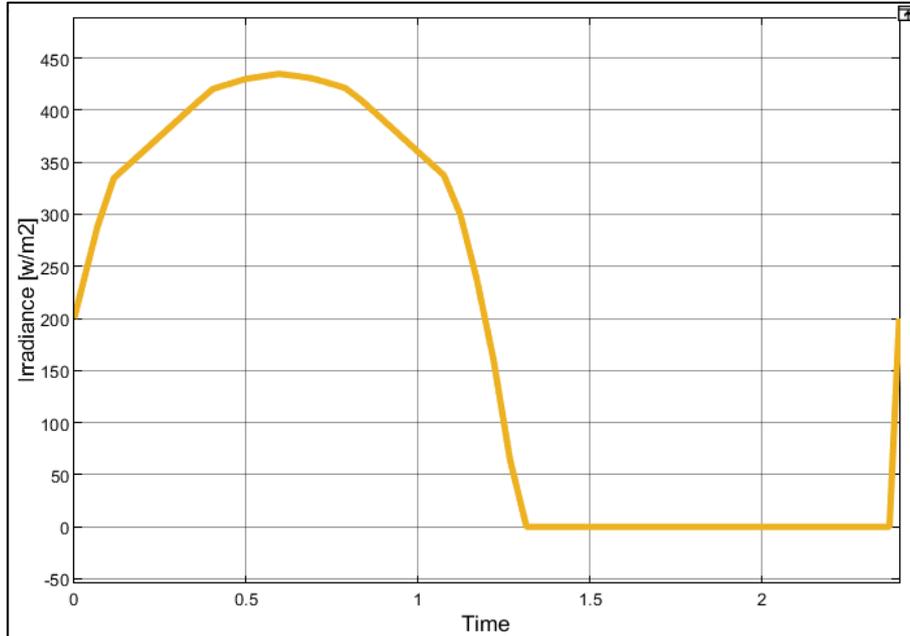


Figura 3.1 Irradiancia solar

Los paneles fotovoltaicos también tienen su comportamiento en función de la cantidad de paneles solares y como están conectados, esto se visualiza en la figura 3.2 donde se evidencia el punto de máxima potencia del arreglo de paneles solares.

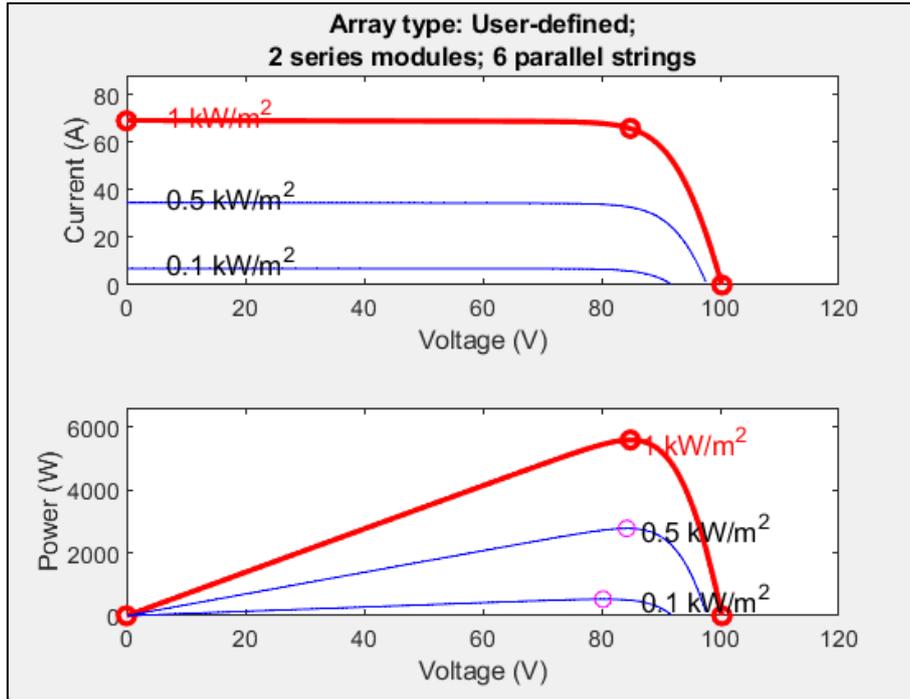


Figura 3.2 Parámetros del arreglo de paneles solares

La pila de combustible PEM, al igual de los paneles fotovoltaicos, entregan una señal de corriente continua (DC) y su rango de voltaje y corriente varía en función de la potencia entregada. El comportamiento de dichos parámetros se observa en la figura 3.3.

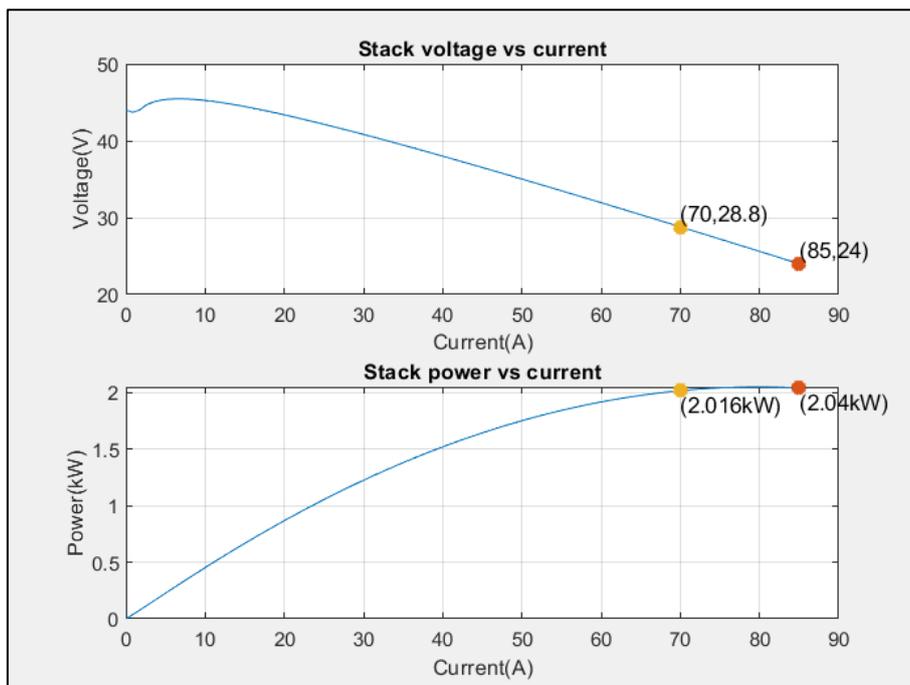


Figura 3.3 Parámetros de la pila de combustible

3.1 Respuesta del sistema de hidrógeno

El sistema diseñado es capaz de abastecer el consumo energético de la vivienda tanto en el día como en la noche, esto se puede verificar en el comportamiento de las señales obtenidas en la simulación.

3.1.1 Escenario de circuito abierto

En este escenario la potencia consumida por la carga es de 0 W debido a que el circuito está abierto y no hay forma de que la corriente pueda fluir. Sin embargo, tal como se evidencia en la figura 3.4, el voltaje si tiene un comportamiento sinusoidal de $120 V_{rms}$ a pesar de que la corriente es de 0 A. Cabe recalcar que en esta figura se observa un tiempo de 1 a 1.5 segundos para observar de mejor forma la gráfica sinusoidal de voltaje.

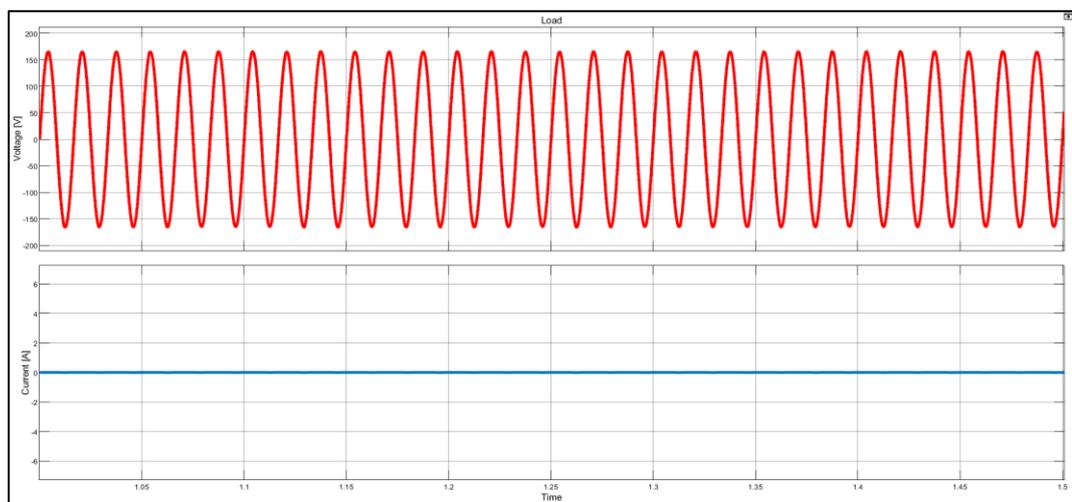


Figura 3.4 Voltaje y corriente del sistema de hidrógeno sin carga

Para comparar de mejor forma la potencia de los equipos, se ubican sus curvas en la misma figura 3.5 donde se observa la potencia de los paneles solares (curva color azul), la pila de combustible (curva color marrón), el electrolizador (curva color rosado) y la carga respectivamente (curva color naranja). En este caso no hay carga y los paneles fotovoltaicos únicamente energizan al electrolizador, por ello la primera curva es igual a la tercera. La segunda curva de potencia es la pila de combustible y no entrega energía durante la noche debido a que no hay carga. La última curva es la potencia de carga y es de 0 W tal como se esperaba.

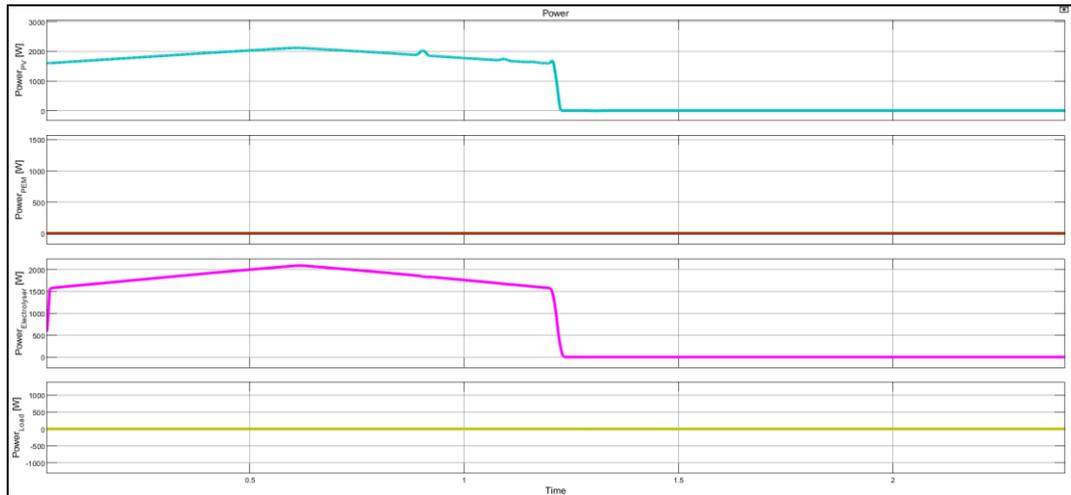


Figura 3.5 Potencia de los equipos del sistema de hidrógeno sin carga

3.1.2 Escenario de circuito con carga

En este caso se tiene la carga del sistema la cual representa la potencia que consume la vivienda. En la figura 3.6 se observa que la corriente tiene un comportamiento sinusoidal al igual que el voltaje, es decir, la corriente depende de la carga la cual corresponde a los electrodomésticos de la vivienda. En otras palabras, el sistema también funciona correctamente cuando hay una carga que demanda energía en la vivienda. Cabe recalcar que en 1.2 segundos se da la transición entre el electrolizador y la pila de combustible, por lo cual es importante verificar que no hay una caída de potencial en la curva.

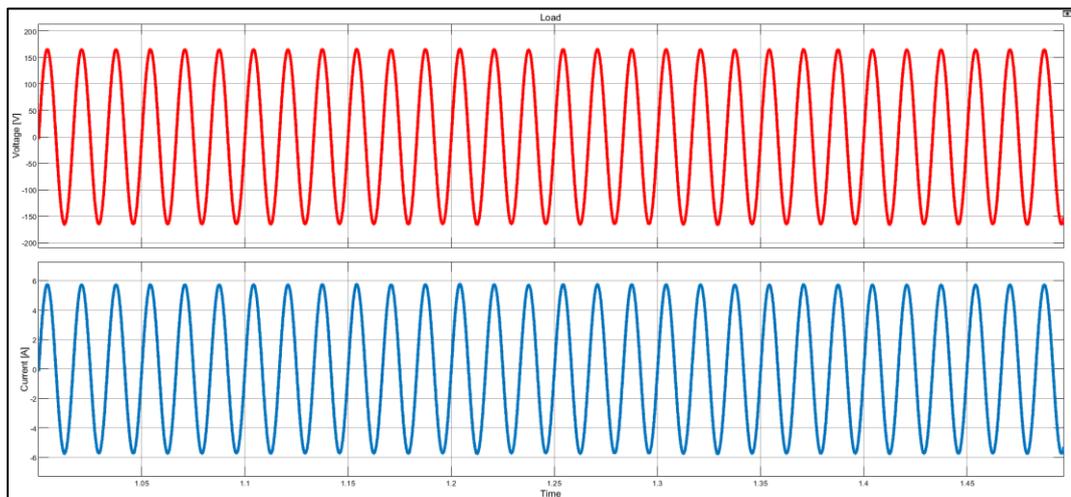


Figura 3.6 Voltaje y corriente de la carga del sistema de hidrógeno

En la figura 3.7 se observa la potencia de los paneles solares (curva color azul), la pila de combustible (curva color marrón), el electrolizador (curva color rosado) y la carga (curva color naranja). Cabe recalcar que la primera mitad del tiempo corresponde al día y el resto es la noche. La primera curva es la potencia de los paneles y se observa que su comportamiento corresponde a la suma de la potencia del electrolizador y de la carga durante el día mientras que la segunda curva es nula ya que la pila de combustible no entrega energía durante el día. En la noche, la pila de combustible entrega energía únicamente a la carga y por ello tienen el mismo valor de potencia de la carga durante todo el periodo de la noche.

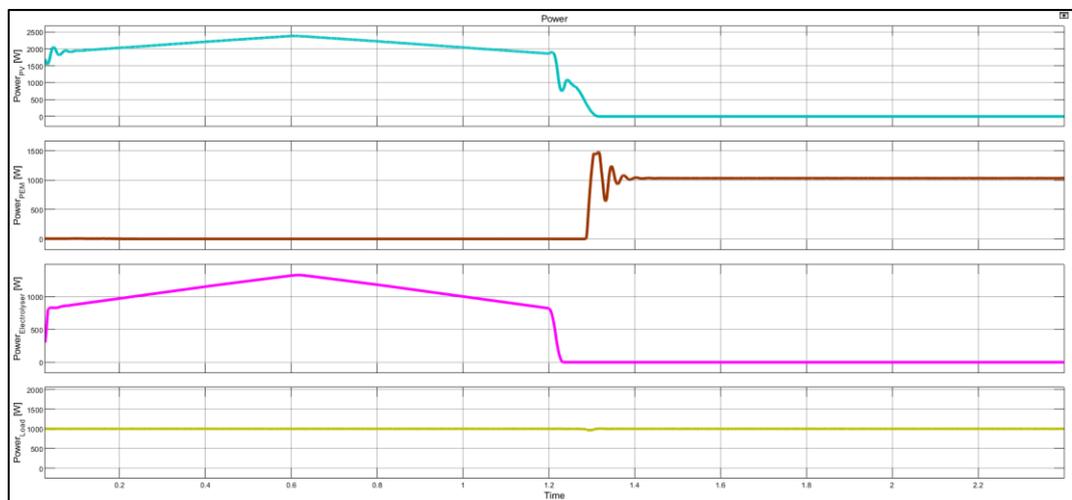


Figura 3.7 Potencia de los equipos del sistema de hidrógeno

3.2 Respuesta eléctrica de la pila de combustible

La pila de combustible tiene distintos parámetros los cuales al ser modificados varían el comportamiento eléctrico del sistema. Por tanto, se presentan distintas comparaciones respecto a cómo se comporta la pila PEM al variar parámetros como la presión y la carga.

3.2.1 Respuesta ante variación de la presión

En la figura 3.8 se observa la comparación de la eficiencia a distintas presiones, ahí se evidencia que mientras menor sea la presión del combustible mayor será la eficiencia. Este comportamiento se justifica en la ecuación 2.20 y 2.22 donde hay una relación inversamente proporcional entre dichos parámetros.

La relación de la eficiencia respecto a la corriente también se justifica con la ecuación 2.20 y 2.22 puesto que son directamente proporcionales. Con las mismas ecuaciones se obtiene una relación inversamente proporcional entre la eficiencia y la presión, es decir, a menor presión se obtiene mayor eficiencia.

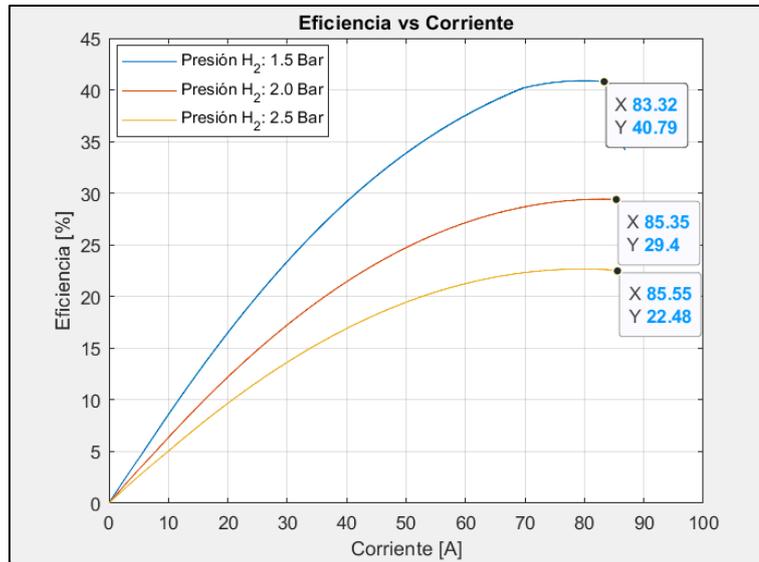


Figura 3.8 Eficiencia vs corriente con 1.5 Bar de H₂

La figura 3.9 muestra el comportamiento de la eficiencia respecto al consumo de hidrógeno, esto se evidencia en la ecuación 2.22 puesto que la relación entre ambos parámetros es directamente proporcional.

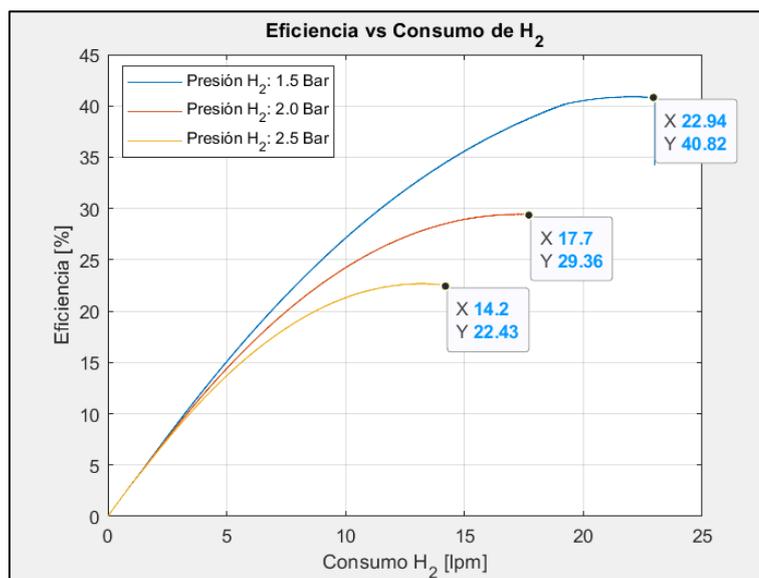


Figura 3.9 Eficiencia vs consumo de H₂ con 1.5 Bar de H₂

De las gráficas 3.8 y 3.9 se puede concluir que es más eficiente utilizar una presión de combustible de 1.5 Bar, cabe recalcar que en este caso las gráficas corresponden tomando en cuenta el caudal máximo de la pila de combustible. Por tanto, en la tabla 3.1 se observan los distintos parámetros de la pila cuando la presión de combustible es de 1.5 Bar y con el caudal máximo.

Tabla 3.1 Resultados de la pila de combustible con 1.5 Bar de H₂

Potencia [kW]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Consumo de H ₂ [lpm]	Consumo de aire [lpm]	Eficiencia [%]
0.5	42.86	11.65	3.12	11.50	9.91
1.0	40.34	24.80	6.85	24.64	19.97
1.5	36.16	41.41	11.44	40.99	29.94

En la tabla 3.1 se observan distintos parámetros a diferentes potencias, tal como se esperaba, al aumentar la demanda de energía entonces aumenta el consumo de combustible (hidrógeno) y de aire. El comportamiento de los demás parámetros ya se justificó anteriormente en las gráficas donde se evidencia la relación entre el modelo matemático de la pila y de los resultados obtenidos. A pesar de que se eligió utilizar 1.5 Bar debido a su mayor eficiencia respecto a las demás presiones, se evidencia un nivel bajo de eficiencia. Por tanto, es ideal variar otro parámetro de entrada de tal forma que en la salida se obtenga la mayor eficiencia posible.

3.2.2 Respuesta ante variación del caudal

De acuerdo a lo anterior, se observa que la mayor eficiencia se da cuando la presión del combustible es de 1.5 Bar con el 100% de caudal. Sin embargo, aún se puede mejorar la eficiencia variando el caudal de hidrógeno. Para ello se verifica la eficiencia para el 25%, 50%, 75% y 100% de caudal con las figuras 3.10 y 3.11. La figura 3.10 presenta la eficiencia de la pila PEM respecto a su corriente para los distintos caudales. Con las curvas se puede identificar que mientras menor sea el caudal mayor será la eficiencia, pero al mismo tiempo la corriente máxima es menor a medida que disminuye el caudal. Igualando la ecuación 2.22 y 2.20 se observa una relación directamente proporcional entre la eficiencia y corriente mientras que la eficiencia es inversamente proporcional al caudal.

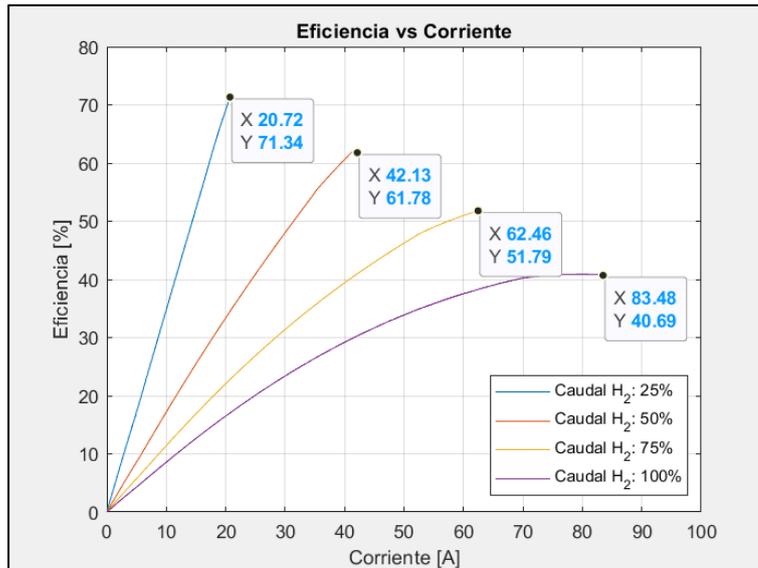


Figura 3.10 Eficiencia vs corriente con el 50% de caudal de H₂

En la figura 3.10 se tiene la eficiencia de la pila PEM respecto al consumo de hidrógeno para distintos caudales. La ecuación 2.22 describe el comportamiento directamente proporcional entre eficiencia y consumo de hidrógeno mientras que la ecuación 2.22 y 2.20 presenta una relación inversamente proporcional entre la eficiencia y el caudal de combustible, por ello a menor caudal mayor es la eficiencia. Sin embargo, según la figura 3.10 se tiene que la corriente máxima que entrega la pila disminuye a menor caudal, por ello es preferible usar 50% de caudal ya que usar 25% no permite abastecer la potencia de la vivienda.

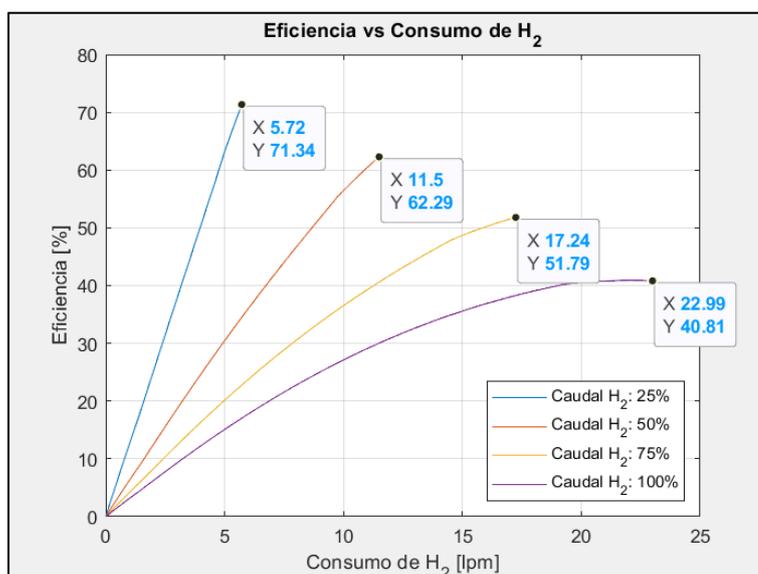


Figura 3.11 Eficiencia vs consumo de H₂ con el 50% de caudal de H₂

Por tanto, usar 50% (11.5 lpm) del caudal máximo (23 lpm) con una presión de 1.5 Bar de combustible permite obtener una potencia máxima instantánea de hasta 1.5 kW lo cual es suficiente para abastecer de energía una vivienda en las noches. En la tabla 3.2 se evidencia una eficiencia promedio de 40.17 %.

Tabla 3.2 Resultados de la pila de combustible con 50% caudal de H₂

Potencia [kW]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Consumo de H ₂ [lpm]	Consumo de aire [lpm]	Eficiencia [%]
0.5	43.14	11.60	3.01	11.43	19.97
1.0	41.26	24.27	6.70	23.92	39.94
1.5	38.2	39.24	10.87	38.67	60.61

3.3 Respuesta del sistema convencional

El sistema convencional consiste en utilizar baterías en lugar del electrolizador, bombona y la pila de combustible, es decir, sigue siendo necesario utilizar paneles fotovoltaicos y el inversor regulador. En la figura 3.12 se observa como varía la corriente del panel solar de igual forma que la irradiancia, mientras tanto, el voltaje corresponde al de máxima potencia gracias al regulador MPPT simulado. El voltaje del conjunto de paneles es de aproximadamente 62 V cuyo valor se justifica con la hoja de datos del panel de 405 W, cabe recalcar que el sistema convencional usa paneles de menor potencia respecto al sistema basado en hidrógeno. Además, durante la noche ya no hay ninguna irradiancia por lo cual la corriente que entregan los paneles es nula y entra a funcionar la batería.

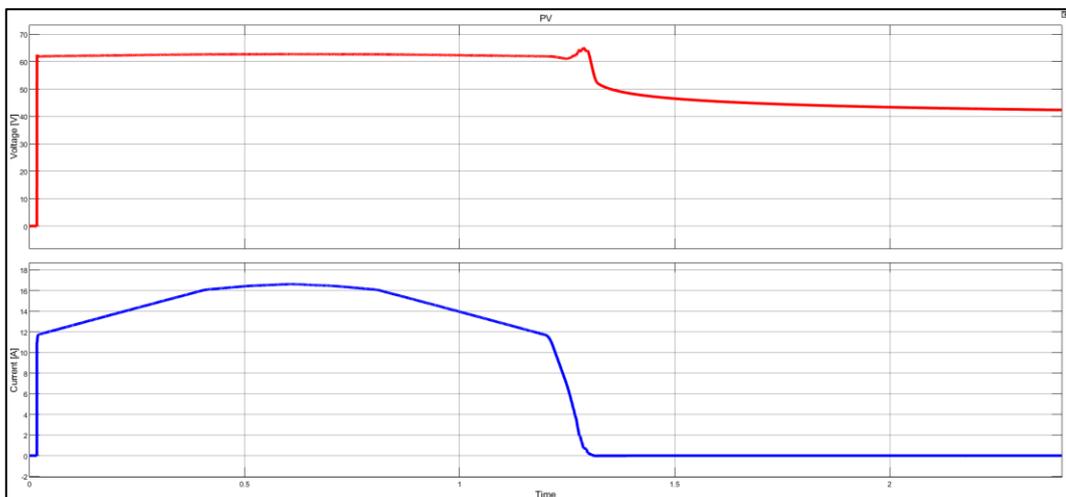


Figura 3.12 Voltaje y corriente de los paneles del sistema convencional

En la figura 3.13 se observa el voltaje, corriente y el estado de carga de la batería. Tal como se esperaba, la corriente de la batería varía en función del nivel de irradiancia y la corriente demandada por la carga. En este caso se fija una carga constante para evidenciar de mejor forma el comportamiento del sistema, la carga demanda corriente a los paneles mientras que el excedente de corriente carga la batería. El estado de carga de la batería se observa en la curva 3, en la primera mitad del periodo la curva va en aumento lo que indica que la batería se está cargando mientras que en la siguiente mitad del periodo la curva va decreciendo lo que indica que la batería se está descargando.

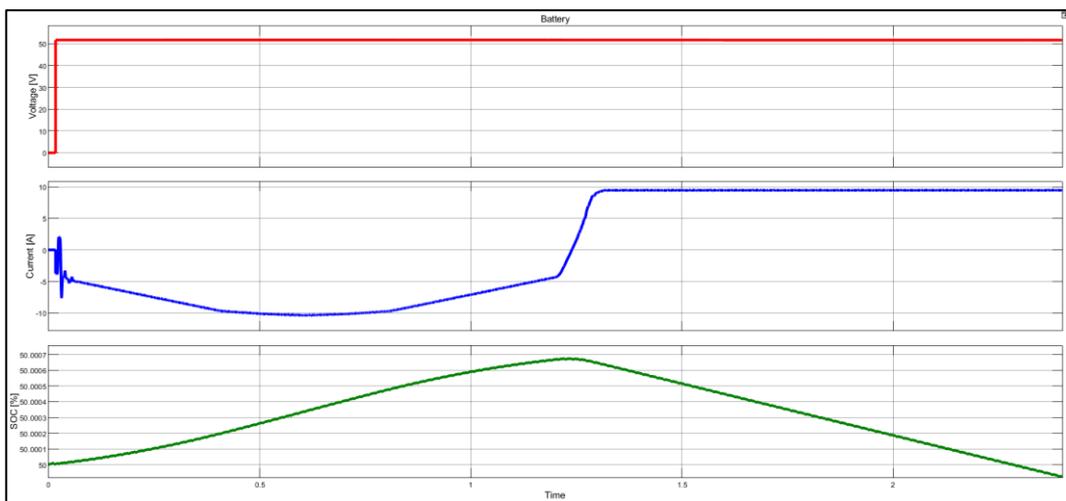


Figura 3.13 Voltaje, corriente y SOC de la batería del sistema convencional

En la figura 3.14 se evidencia el comportamiento senoidal del voltaje y la corriente de carga, los electrodomésticos funcionan con un voltaje de $120 V_{rms}$ lo cual se obtiene en la primera curva (voltaje) mientras que la segunda curva (corriente) depende de la potencia demandada. En este caso se simuló una carga constante y por ello el comportamiento de la corriente no varía, sin embargo, al variar la carga también varía el valor máximo y mínimo de la curva de corriente. Por tanto, se puede observar un comportamiento estable en el voltaje y corriente lo que indica que los paneles solares pueden abastecer la demanda de la vivienda y también cargar la batería durante el día mientras que en la noche la batería se encarga de abastecer la demanda energética.

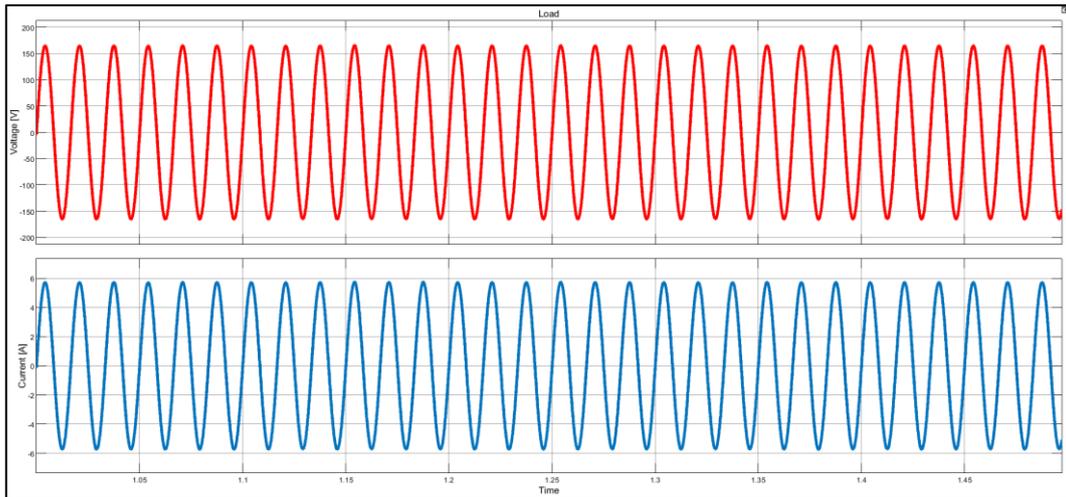


Figura 3.14 Voltaje y corriente de la carga del sistema convencional

En la figura 3.15 se observa la potencia de los paneles fotovoltaicos, de la batería y de la carga. La primera curva corresponde a la potencia de los paneles, ahí se observa que los paneles entregan potencia en función de la irradiancia durante del día mientras que en la noche la potencia entregada es nula. La segunda curva es la potencia de la batería y su comportamiento es negativo ya que representa la energía que la batería está recibiendo de los paneles mientras que en la noche la potencia es positiva y entregada a la carga. La última curva representa la potencia de la carga la cual se obtiene multiplicando el valor eficaz de la corriente y del voltaje de carga, además, su valor es constante puesto que en este caso se simuló un sistema sin variación en la carga.

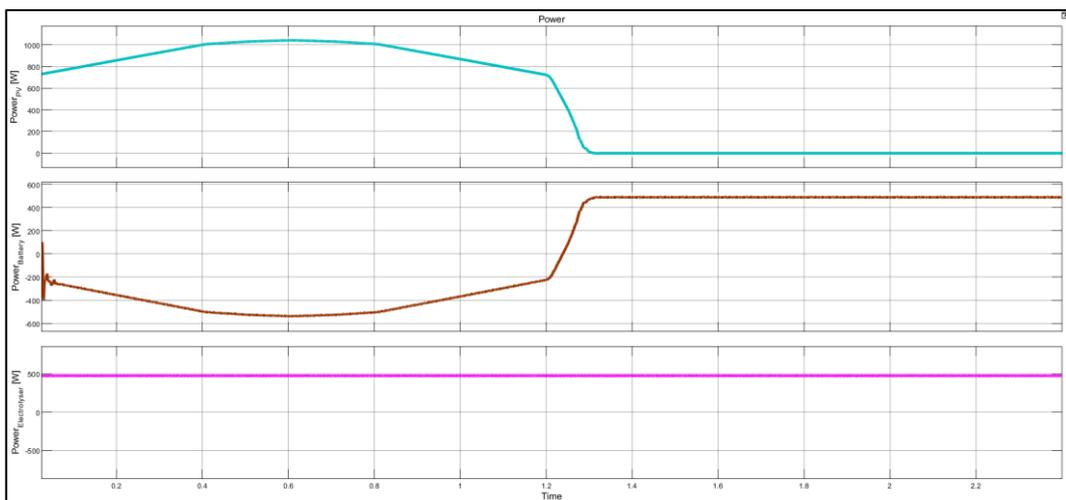


Figura 3.15 Potencia de los equipos del sistema convencional

En la tabla 3.3 se observa la eficiencia de ambos sistemas donde se resalta que el de hidrógeno es menos eficiente. La eficiencia de los equipos se obtiene de la hoja de datos mientras que la eficiencia de la pila de combustible se obtuvo con la simulación.

Tabla 3.3 Eficiencia de la pila PEM y la batería

	Eficiencia de la Pila/Batería [%]
Sistema de hidrógeno	40.17
Sistema convencional	85.00

3.4 Análisis de costos

El sistema basado en hidrógeno cumple la misma función que los sistemas convencionales, sin embargo, es importante tener en cuenta el precio de cada sistema puesto que permite definir si es viable económicamente. En este caso se utiliza un electrolizador, bombona de hidrógeno y una pila de combustible para reemplazar la batería de litio que comúnmente es usada en los sistemas fotovoltaicos. Por tanto, se evidencia una diferencia en costos puesto que los equipos usados son diferentes.

3.4.1 Costo del sistema basado en hidrógeno

En la tabla 3.4 se detalla el costo de cada equipo del sistema diseñado. Cabe recalcar que solo se menciona el costo de los equipos del sistema puesto que no hay una implementación del mismo para detallar el costo de mano de obra.

Tabla 3.4 Detalle de costos de los equipos del sistema de hidrógeno

Listado de equipos del sistema			
Cant.	Nombre	Precio Unitario \$	Precio Total \$
12	Panel solar 465W JAM72S20-465/MR	170.90	2,050.80
2	Estructura 6 Paneles 30-45mm Coplanar Falcat	178.29	356.58
1	Inversor cargador Growatt SPF 6000T DVM 48V 5kW	1,120.76	1,120.76
3	Electrolizador PEM HY-5000 48V	3,200.00	9,600.00
1	Pila PEM H-2000	11,575.00	11,575.00
1	Convertidor elevador 48V	71.25	71.25
1	Kit material eléctrico	366.91	366.91
1	Rollo de cable unifilar 6mm2 H1Z2Z2-K 20m rojo	26.77	26.77
1	Rollo de cable unifilar 6mm2 H1Z2Z2-K 20m negro	26.77	26.77
1	Conector WEIDMULLER PVStick	7.66	7.66
Total			25,202.50

3.4.2 Costo del sistema convencional

Los equipos del sistema convencional se detallan en la tabla 3.5 con su costo.

Tabla 3.5 Detalle de costos de los equipos del sistema convencional [20]

Listado de equipos del sistema			
Cant.	Nombre	Precio Unitario \$	Precio Total \$
6	Panel solar 405W Deep Blue 3.0 JA Solar Mono	152.00	912.00
1	Estructura 6 Paneles 30-45mm Coplanar Falcat	178.29	178.29
3	Módulo Batería Litio Growatt 48V 50Ah	1,225.78	3,677.34
1	Base de batería Growatt ARK	35.60	35.60
1	Cableado Growatt ARK LV-SPF-SPH	37.27	37.27
1	Inversor cargador Growatt SPF 3,500W 48V 80A	577.91	577.91
1	Kit material eléctrico	366.91	366.91
1	Rollo de cable unifilar 6mm2 H1Z2Z2-K 20m rojo	26.77	26.77
1	Rollo de cable unifilar 6mm2 H1Z2Z2-K 20m negro	26.77	26.77
1	Conector WEIDMULLER PVStick	7.66	7.66
Total			5,846.52

En la figura 3.16 se observa que la amortización del sistema convencional es de 2 años, es decir, en dicho periodo de tiempo se recupera lo invertido. Con el resultado de la tabla 3.4 se determina que el sistema basado en hidrógeno es aproximadamente 4 veces más costoso que un sistema convencional cuyo costo se detalla en la tabla 3.5, por ello no hay viabilidad económica al usar hidrógeno.



Figura 3.16 Amortización del kit solar [20]

3.5 Módulo experimental

El sistema de hidrógeno diseñado fue implementado con un modelo a menor escala que se visualiza en la figura 3.17. Este módulo cuenta con una pila PEM reversible, microcontrolador, relé, batería y una vivienda con leds que representa la carga.

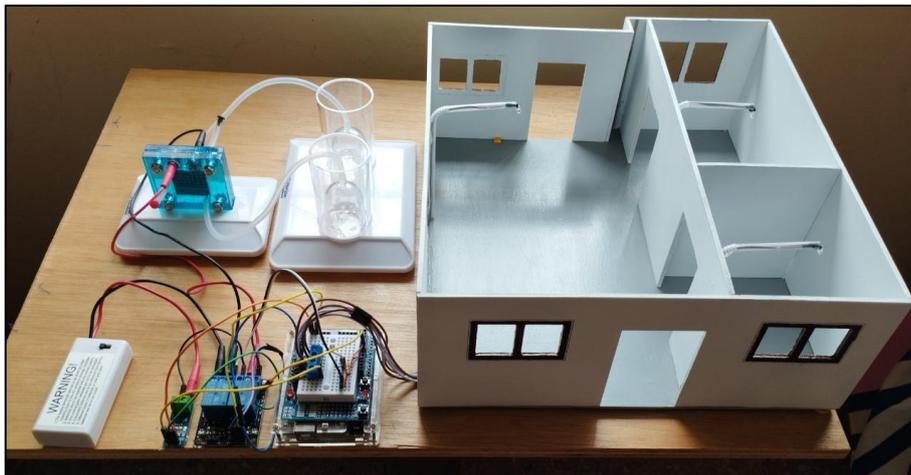


Figura 3.17 Módulo experimental del sistema de hidrógeno

En la figura 3.18 se evidencia los equipos para la producción de hidrógeno. Se tiene una pila PEM reversible que permite generar hidrógeno al igual que un electrolizador y de igual forma consumir el hidrógeno para generar electricidad como lo hace una pila de combustible. Mediante el microcontrolador de una placa ARDUINO se realiza el control para activar o no el relé, el relé permite conectar la pila PEM a una batería para generar hidrógeno y luego el relé se activa de tal forma que conecta la pila PEM a la carga.

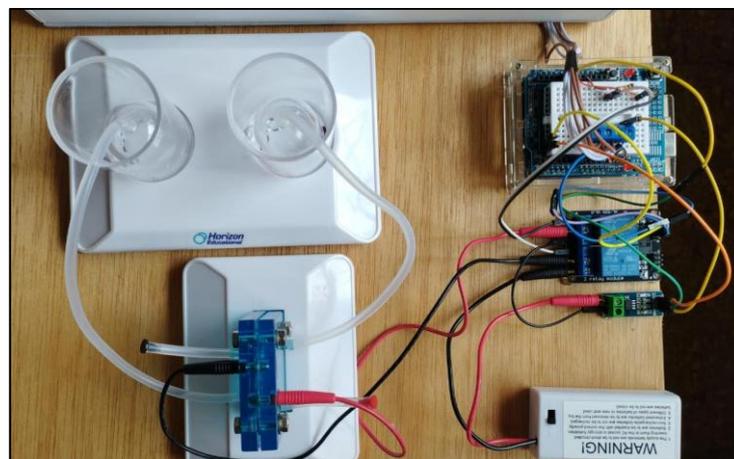


Figura 3.18 Producción de hidrógeno con el módulo experimental

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El sistema de hidrógeno diseñado es capaz de abastecer la demanda de una vivienda rural unifamiliar, es decir, una vivienda con un mínimo consumo de energía respecto a otras. Para cubrir una mayor demanda se requiere de una mayor cantidad de hidrógeno puesto que sirve como combustible para la pila de combustible PEM.

Un sistema eléctrico basado en hidrógeno no es viable económicamente puesto que su costo es aproximadamente 4 veces mayor a un sistema fotovoltaico convencional, esto lo demuestra los resultados de las simulaciones y el costo de los equipos según el mercado actual.

Usar combustible fósil como fuente de energía es menos costoso respecto a utilizar hidrógeno verde, sin embargo, es más contaminante al igual que utilizar baterías de litio en los sistemas fotovoltaicos. Por tanto, no es común usar hidrógeno verde como fuente de energía.

El sistema basado en hidrógeno usa una pila PEM con eficiencia de 40.17%, esta eficiencia es menor respecto a la batería del sistema fotovoltaico cuya eficiencia es de 85%. La diferencia en la eficiencia de ambos sistemas se da debido a que se necesita de mayor energía para obtener hidrógeno y usarlo como combustible en la pila PEM, además, de más subprocesos.

Generar electricidad de forma limpia y renovable es posible con el hidrógeno verde el cual se obtiene mediante el uso de energías renovables como la energía solar. Sin embargo, los sistemas basados en combustible fósil como los grupos electrógenos son más usados puesto que generan electricidad a un menor costo sin tomar en cuenta la contaminación que producen.

Recomendaciones

Se recomienda realizar el constante mantenimiento al sistema diseñado en caso de una futura implementación, especialmente a los paneles solares ya que tienen un grado de inclinación que facilita ensuciar su superficie y con ello afectar el nivel de irradiación solar obtenida durante el día.

Es recomendable implementar una adecuada ventilación para el hidrógeno almacenado, esto permite evitar cualquier tipo de accidente en caso de una posible fuga del gas puesto que es extremadamente inflamable. Cabe recalcar que la bombona de hidrógeno evita el contacto del gas con la atmósfera haciendo seguro el sistema diseñado.

En el caso de un aumento en la demanda energética de la vivienda se recomienda realizar un rediseño del sistema puesto que está orientado a las viviendas rurales unifamiliares lo que indica un menor consumo respecto a las viviendas rurales o con más de una familia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Rodríguez. (2022, Septiembre 16). Propiedades del hidrógeno [Online]. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hidrogeno-h_18653
- [2] P. Buitrago. (2021, Octubre 29). Hidrógeno gris, verde y azul. ¿Sabe qué son y para qué sirven? [Online]. Disponible en: <https://mascolombia.com/hidrogeno-gris-verde-y-azul-sabe-que-son-y-para-que-sirven/>
- [3] S. Alcalde. (2019, Diciembre 8). Ventajas e inconvenientes del hidrógeno como combustible alternativo [Online]. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/ventajas-e-inconvenientes-hidrogeno-como-combustible-alternativo_14897
- [4] J. Romero, “Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción,” Tesis de grado, Esc. Ing. Ind., Univ. De Valladolid, España, 2018.
- [5] I. M. Pérez, “Producción de hidrogeno a alta temperatura,” Tesis de grado, Dept. Ing. Energ., Univ. De Sevilla, Sevilla, España, 2020.
- [6] G. Pratt. (2022, Octubre 28). Electrólisis de hidrógeno [Online]. Disponible en: <https://www.crowcon.com/es/blog/hydrogen-electrolysis/>
- [7] E. Rozzi, F. D. Minuto, A. Lanzini, y P. Leone, “Green synthetic fuels: Renewable routes for the conversion of non-fossil feedstocks into gaseous fuels and their end uses”, *Energies*, vol.13, pp 1-96, 2020.
- [8] F. L. Jiménez, “Evaluación técnica y económica del uso de hidrogeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil,” Tesis de grado, Dept. Ing. Elect., Univ. De Chile, Santiago de Chile, 2020.
- [9] Centro Nacional de Hidrogeno. (2019, Febrero 7). Pilas de combustible [Online]. Disponible en: <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- [10] B. M. Roman, B. C. Arevalo, “Análisis de la producción de hidrogeno a partir de energía solar fotovoltaica,” Tesis de grado, Fac. Cs. Ingen., Univ. Estatal de Milagro, Milagro, Ecuador, 2018.
- [11] AutoSolar. “¿Qué es un regulador de carga?” [Online]. Disponible en: <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/que-es-un-regulador-de-carga>

- [12] W. Nsour, T. Taa'mneh, O. Ayadi, J. A. Asfar, "Design of Stand-Alone Proton Exchange Membrane Fuel Cell Hybrid System under Amman Climate", Journal of Ecological Engineering, vol. 20, pp 1-10, 2019.
- [13] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, "Plan Maestro de Electrificación 2013 -2022," [Online]. Disponible en: <https://www.ariae.org/sites/default/files/2017-04/vol1-Resumen-Ejecutivo-PME-2013-2022.pdf>
- [14] K. A. Pantaleón, C. M. Pendolema, "Diseño de un sistema de gestión de carga de una micro-red utilizando simulación en tiempo real", Tesis de grado, FIEC, ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [15] F. Troncoso, "Claves del Hidrogeno verde," [Online]. Disponible en: <https://www.induambiente.com/informe-tecnico/calderas/claves-del-hidrogeno-verde>
- [16] AutoSolar. "JAM7S20 440-465/MR SERIES," [Online]. Disponible en: <https://autosolar.pe/pdf/Panel-ja-solar-450w-24v.pdf>
- [17] AutoSolar, "Inversor Cargador Growatt SPF 6000T DVM," [Online]. Disponible en: <https://autosolar.co/inversores-cargadores-48v/inversor-cargador-growatt-spf-6000t-dvm>
- [18] Alibaba.com, "5000 MI/min Hydrogen Pem Tech Titanium Electrolyzer Hydrogen And Oxygen Separated Electrolysis Cell - Buy Electrolysis Cell,Hydrogen Pem Tech Titanium Electrolyzer,Electrolyzer Hydrogen Product on Alibaba.com," [Online]. Disponible en: https://www.alibaba.com/product-detail/5000-ml-min-hydrogen-PEM-tech_1600470409131.html
- [19] H2planet, "H 2000," [Online]. Disponible en: <https://www.h2planet.eu/es/detail/H2000>.
- [20] AutoSolar, "Kit Solar Litio Growatt 3500W 12kWhdia," [Online]. Disponible en: <https://autosolar.es/kit-solar-aislada/kit-solar-litio-growatt-3500w-12kwhdia>
- [21] MathWorks, "Implement PV array modules - Simulink," [Online]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html>
- [22] MathWorks, "Implement generic hydrogen fuel cell stack model – Simulink," [Online]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html>

APÉNDICES

APÉNDICE A

La siguiente tabla detalla el factor de corrección de las horas solar pico para latitud de 2° con su respectivo ángulo de inclinación.

Factor de corrección de las horas solar pico

Latitud= 2°												
Inc	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1.02	1.01	1	0.98	0.97	0.96	0.97	0.98	1	1.02	1.02	1.03
10	1.04	1.02	0.99	0.96	0.93	0.92	0.93	0.96	0.99	1.02	1.04	1.05
15	1.05	1.02	0.98	0.93	0.89	0.87	0.89	0.93	0.98	1.02	1.05	1.06
20	1.05	1.01	0.96	0.89	0.84	0.82	0.84	0.89	0.96	1.02	1.06	1.07
25	1.04	1	0.93	0.85	0.79	0.76	0.78	0.84	0.93	1.01	1.06	1.07
30	1.03	0.98	0.90	0.80	0.73	0.69	0.72	0.80	0.89	0.99	1.05	1.06
35	1.02	0.95	0.86	0.75	0.66	0.62	0.65	0.74	0.85	0.96	1.03	1.05
40	0.99	0.92	0.81	0.69	0.59	0.55	0.58	0.68	0.81	0.93	1.01	1.03
45	0.96	0.88	0.77	0.63	0.52	0.47	0.51	0.62	0.75	0.89	0.98	1
50	0.93	0.84	0.71	0.57	0.45	0.39	0.43	0.55	0.70	0.84	0.94	0.97
55	0.89	0.79	0.65	0.50	0.37	0.31	0.35	0.48	0.64	0.79	0.90	0.93
60	0.84	0.74	0.59	0.42	0.29	0.23	0.27	0.40	0.57	0.74	0.85	0.88
65	0.79	0.68	0.53	0.35	0.20	0.14	0.19	0.32	0.50	0.68	0.80	0.84
70	0.73	0.62	0.46	0.27	0.13	0.12	0.11	0.24	0.43	0.61	0.74	0.78
75	0.67	0.56	0.39	0.19	0.12	0.11	0.11	0.16	0.36	0.55	0.68	0.72
80	0.61	0.49	0.31	0.13	0.11	0.10	0.10	0.10	0.28	0.47	0.61	0.66
85	0.54	0.42	0.24	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09	0.20	0.40	0.54	0.59
90	0.47	0.35	0.16	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.012	0.32	0.47	0.52

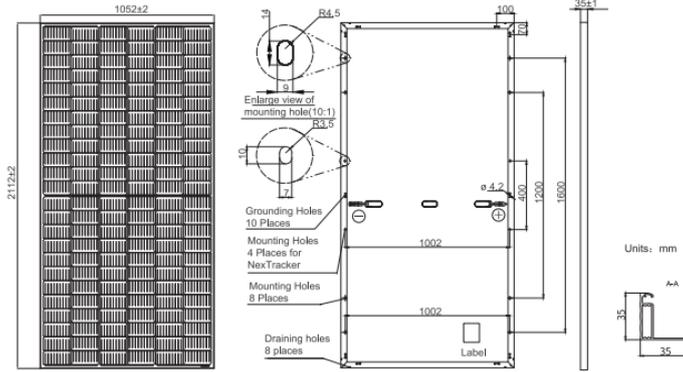
APÉNDICE B

Se tiene la hoja de datos del panel solar elegido para el sistema de hidrógeno.

JA SOLAR

JAM72S20 445-470/MR Series

MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	24.7kg±3%
Dimensions	2112±2mm×1052±2mm×35±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) , 12 AWG(UL)
No. of cells	144 (6×24)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4.10(1000V) QC 4.10-35(1500V)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)/400mm(-); Landscape: 1200mm(+)/1200mm(-)
Packaging Configuration	31pcs/pallet 682pcs/40ft Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM72S20 -445/MR	JAM72S20 -450/MR	JAM72S20 -455/MR	JAM72S20 -460/MR	JAM72S20 -465/MR	JAM72S20 -470/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	445	450	455	460	465	470
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	49.56	49.70	49.85	50.01	50.15	50.31
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	41.21	41.52	41.82	42.13	42.43	42.69
Short Circuit Current(Isc) [A]	11.32	11.36	11.41	11.45	11.49	11.53
Maximum Power Current(Imp) [A]	10.80	10.84	10.88	10.92	10.96	11.01
Module Efficiency [%]	20.0	20.3	20.5	20.7	20.9	21.2
Power Tolerance	0~+5W					
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0.044%/°C					
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})	-0.272%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0.350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

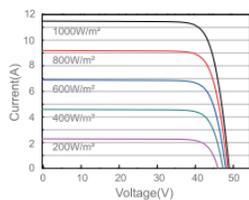
Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer,They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

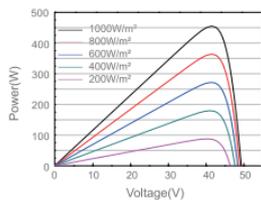
TYPE	JAM72S20 -445/MR	JAM72S20 -450/MR	JAM72S20 -455/MR	JAM72S20 -460/MR	JAM72S20 -465/MR	JAM72S20 -470/MR	OPERATING CONDITIONS
Rated Max Power(Pmax) [W]	336	340	344	348	352	355	Maximum System Voltage 1000V/1500V DC
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	46.65	46.90	47.15	47.38	47.61	47.84	Operating Temperature -40°C~+85°C
Max Power Voltage(Vmp) [V]	38.95	39.19	39.44	39.68	39.90	40.10	Maximum Series Fuse Rating 20A
Short Circuit Current(Isc) [A]	9.20	9.25	9.29	9.33	9.38	9.42	Maximum Static Load,Front* 5400Pa(112 lb/ft ²) Maximum Static Load,Back* 2400Pa(50 lb/ft ²)
Max Power Current(Imp) [A]	8.64	8.68	8.72	8.76	8.81	8.86	NOCT 45±2°C
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C,wind speed 1m/s, AM1.5G						Safety Class Class II
*For NexTracker installations ,Maximum Static Load, Front is 1800Pa while Maximum Static Load, Back is 1800Pa.							Fire Performance UL Type 1

CHARACTERISTICS

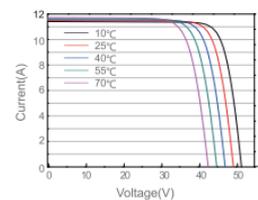
Current-Voltage Curve JAM72S20-455/MR



Power-Voltage Curve JAM72S20-455/MR



Current-Voltage Curve JAM72S20-455/MR



Premium Cells, Premium Modules

Version No. : Global_EN_20201118A

APÉNDICE C

Se adjunta la hoja de datos del inversor regulador el cual cuenta con ambas funciones de regular la carga y transformar corriente continua en alterna.

Off Inverter

SPF

4000~12000T

DVM



- Off grid energy storage inverter
- 120/240Vac Split Phase output
- Built-in MPPT solar charge controller

Datasheet	SPF 4000T DVM	SPF 5000T DVM	SPF 6000T DVM	SPF 8000T DVM	SPF 10000T DVM	SPF 12000T DVM
Battery Voltage	48VDC					
Battery Type	Lithium/Lead-acid					
INVERTER OUTPUT						
Rated Power	4KW	5KW	6KW	8KW	10KW	12KW
Surge Rating	12KW	15KW	18KW	24KW	30KW	36KW
Waveform	Pure sine wave/ same as input (bypass mode)					
Nominal Output Voltage RMS	104-110-115-120/208-220-230-240VAC(optional)					
Output Frequency	50Hz/60Hz +/-0.3 Hz					
Inverter Efficiency(Peak)	>85%					
Transfer Time	10ms(max)					
SOLAR CHARGER						
Maximum PV Charge Current	80A			120A		
Maximum PV Array Power	5000W			7000W		
Number of independent MPP trackers/ strings per MPP tracker	1/1			2/1		
MPPT Range @ Operating Voltage(VDC)	60~145VDC			60~145VDC		
Maximum PV Array Open Circuit Voltage	150VDC			150VDC		
Maximum Efficiency	>98%			>98%		
AC INPUT						
Voltage	240VAC					
Selectable Voltage Range	184~272VAC(UPS); 154~272VAC(APL)					
Frequency Range	50Hz/60Hz (Auto sensing)					
Max. Charging Current	40A	50A	60A	70A	80A	100A
MECHANICAL SPECIFICATIONS						
Protection Degree	IP20					
Dimensions (W/H/D)	360/540/218mm	360/540/218mm	360/540/218mm	380/650/225mm	380/650/225mm	380/650/225mm
Weight	42kg	47kg	52kg	64kg	66kg	75kg
OPERATING ENVIRONMENT						
Operation Temperature Range	0°C to 45°C					

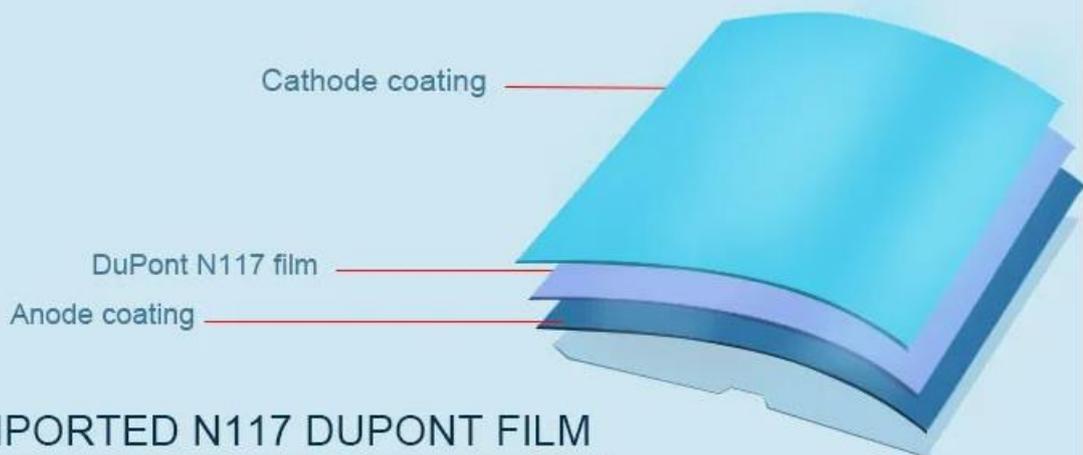
APÉNDICE D

La siguiente información corresponde a la hoja de datos del electrolizador con tasa de producción de hidrógeno de 5000 mL/min.

Product Advantages

Characteristics and Advantages:

1. The working medium is pure water, no-corrosive, no-pollution, no damage to the environment and human body.
2. High efficiency (>91%), low energy consumption, long lifespan.
3. High gas purity, the purity of hydrogen is >99.99%, which can compatible with hydrogen fuel cell systems.
4. High hydrogen outlet pressure (outlet pressure can be designed according to demand).



IMPORTED N117 DUPONT FILM

Both sides are supplemented with PT platinum solid electrolyte, and the most advanced pure titanium fiber electrode is used, which has stable hydrogen production, sufficient gas volume, high purity and long life.

Products Description



CH-5000PEM hydrogen Eletrolyzer

Hydrogen flow rate	5000ml/min
Cycling way	Natural cycling
Hydrogen purity	99.99%
Electrolytic way	pure water electrolysis
Single pool voltage	1.8v-2.0v
Dimension(without PVC connecting)	165×126.5×88.5mm
Unit Weight	3kg
Water	Pure water、deionized water
Power	constant current power supply

PEM Eletrolyzer cell

PEM Eletrolyzer cell is an advanced patented product, which are light , highly effective, energy-saving and of environmental protection , producing hydrogen and oxygen through the electrolysis of pure water (without adding alkali). That's PEM technology. The SPE electrodes, as the core of cell , are highly active catalytic electrode with nearly zero distance between the electrodes , which is formed by integrating composite catalyst with and ion membrane with high electrolytic efficiency.





Working Principle

Electrolytic water meeting the requirements (with electrical resistivity $> 1\text{M}\Omega/\text{cm}$), after being put into the anode chamber of electrolytic cell, when power is switched on, will be decomposed at once at the anode: $2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}^+ + 2\text{O}^{2-}$. The decomposed negative oxygen anion (O^{2-}) will immediately release electron to form oxygen (O_2) gas. The hydrogen proton, in the form of aqua ion ($\text{H}^+ \cdot \text{XH}_2\text{O}$), and under the action of electric field force, through SPE ion membrane, will arrive in the cathode to absorb electron to form hydrogen gas.

Catalogue

ITEM	Hydrogen Electrolyzer
Hydrogen production volume	100ml/min-5000ml/min
Single pool voltage	1.8v-2.0v
Size of 100ml/min (Without&With connecting ports)	60×60×35 & 60×80×61mm
Size of 300ml/min (Without&With connecting ports)	106×94×34 & 116×109×52mm
Size of 600ml/min (Without&With connecting ports)	106×94×44 & 116×109×61mm
Size of 800ml/min (Without&With connecting ports)	106×94×49 & 116×109×66mm
Size of 1000ml/min (Without&With connecting ports)	106×94×54 & 116×109×71mm
Size of 1200ml/min (Without&With connecting ports)	106×94×59 & 116×109×76mm
Size of 1400ml/min (Without&With connecting ports)	106×94×64 & 116×109×81mm
Size of 1600ml/min (Without&With connecting ports)	106×94×69 & 116×109×86mm
Size of 1800ml/min (Without&With connecting ports)	106×94×74 & 116×109×91mm
Size of 2000ml/min (Without&With connecting ports)	106×94×79 & 116×109×96mm
Size of 3200ml/min (Without&With connecting ports)	165×126.5×66.5 & 165×141×83.5mm
Size of 4000ml/min (Without&With connecting ports)	165×126.5×77.5 & 165×141×94.5mm
Size of 5000ml/min (Without&With connecting ports)	165×126.5×88.5 & 165×141×105.5mm

Application

Application of PEM electrolyser hydrogen cell stack:

1. Lab experiment and testing
2. Laboratory Analytic instrument
3. Hydrogen healthy care industry
4. Hydrogen beauty industry
5. Hydrogen supply for fuel cell
6. Other pure H₂ application field



APÉNDICE E

La pila de combustible PEM también cuenta con su hoja de datos donde se detallan sus características técnicas y sus curvas más importantes.

H-Series Fuel Cell Stacks

H-2000 2000W

FCS-C2000

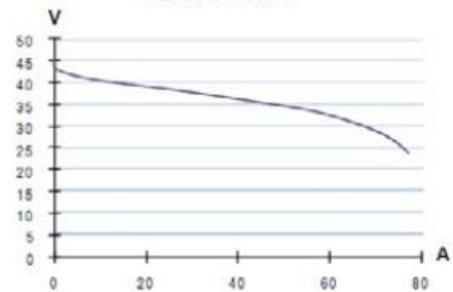


Semi-integrated 2000W fuel cell system

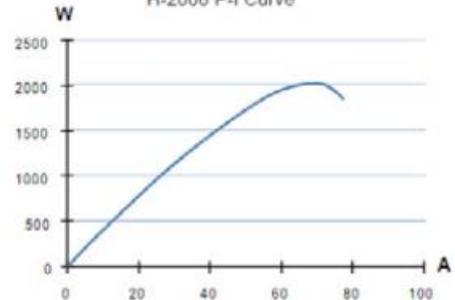
- Connections/Tubing
- Electronic valves
- Electronic control box
- 2000W stack with blower
- Fuel cell ON/OFF switch
- LCD display

INCLUDES

H-2000 U-I Curve



H-2000 P-I Curve





Type of fuel cell	PEM
Number of cells	48
Rated power	2000W
Rated performance	28.8V at 70A
Hydrogen supply valve voltage	12V
Purging valve voltage	12V
Blower voltage	12 V
Reactants	Hydrogen and Air
Ambient temperature	5 - 30°C (41-86°F)
Max stack temperature	65°C (149°F)
Hydrogen pressure	0.45-0.55 Bar
Humidification	Self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Stack weight (with fan and casing)	10kg (±200g)
Controller weight	2500g (±100g)
Stack size	303x350x183mm
Flow rate at max output	26L/min
Hydrogen purity	≥99.995% dry H ₂
Start up time	≤30s (ambient temperature)
Efficiency of system	40% at 28.8V
Low voltage protection	24V
Over current protection	90A
Over temperature protection	65°C
External power supply	13V(±1V),5A-8A

APÉNDICE F

El convertidor elevador a 48 V es fundamental en la salida de la pila de combustible, por ello es importante conocer su rango de operación en la hoja de datos.



DESCRIPCIÓN	VALORACIONES (1)	DETALLES	Denunciar artículo
Nombre de la marca: RCNUN		Tipo: Convertidores CC / CC	
Certificación: CE,RoHS		Origen: CN(Origen)	
Tamaño: 200*127*63mm		Número de modelo: WG-24S4842	
Tipo de salida: single		Potencia de salida: 1-200 kW	
Peso: 2.35kg		Se puede personalizar: Si	
Corriente de salida: 42A		Input voltage range: 20-35Vdc	
Output rated power: 2000 Watt		Efficiency: up to 97%	
Warranty: 1 year		Factory: YES	
In stock: YES		Input Voltage: 24V	
Output Voltage: 48V			

APÉNDICE G

En este apéndice se adjunta los pasos a seguir para el ensamblado de la pila PEM reversible utilizada en el módulo experimental.



Solar Hydrogen Education Kit ASSEMBLY GUIDE



Model No.: FCJJ-16

Warning

To avoid the risk of property damage, serious injury or death:

This kit should only be used by persons 12 years old and up, and only under the supervision of adults who have familiarized themselves with the safety measures described in the kit. Keep small children and animals away, as it contains small parts that could be swallowed. Read the instructions before use and have them ready for reference.

Battery operation instructions:

1. The removing and inserting of batteries is to be conducted by the adults only. Unscrew the screw holding the battery pack's cover in place using a screw driver. Once the screw is removed open the battery pack and take out the batteries using your fingers. Do not use a metal object. When inserting the batteries make sure that you are doing so with the correct polarity (the positive end of the battery must match up with the "+" and the negative end of the battery must match up with the "-" indicated on the battery pack), close the battery pack and secure its cover by tightening the screw with a screw driver.
2. Non-rechargeable batteries are not to be recharged.
3. Different types of batteries such as rechargeable, alkaline and standard batteries or new and used batteries are not to be mixed and should be used separately.
4. The battery pack cables are not to be inserted into an AC socket.
5. The supply terminals of the battery pack are not to be short-circuited.
6. The two spare red&black cables are not to be inserted into an AC socket.
7. Exhausted batteries are to be removed from the battery pack.

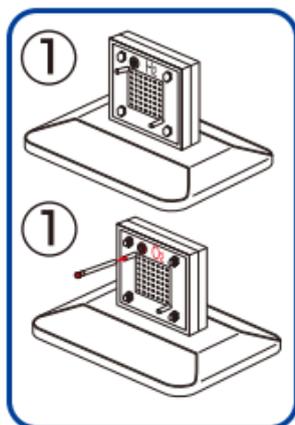
Solar Hydrogen Education Kit

ASSEMBLY GUIDE

What you need: ● SHEK ● AA batteries=2 Units ● Water=100ml ● Scissors

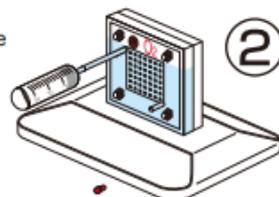
For more detailed description of experimentation possible with this kit refer to the manual provided on CD-ROM.

IMPORTANT: Use common sense when connecting the parts described in this guide. Improper connections can cause failure and permanent damage to your equipment.

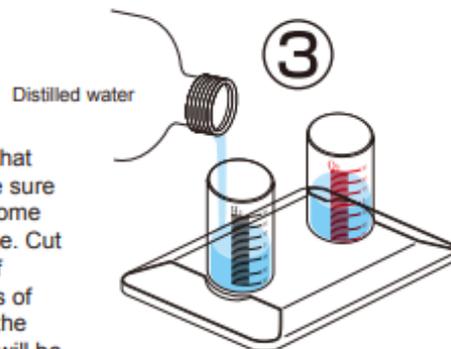


Preparation of the Electrolyzer Module and Solar Powered Hydrogen Production

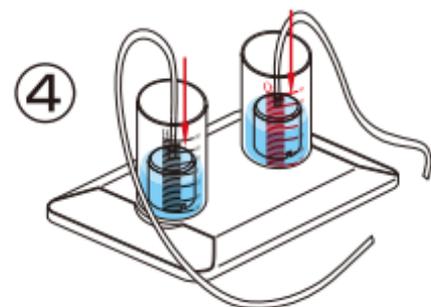
1. Insert the reversible fuel cell, terminals on top, into the slot on the base. Cut 2 x 4cm length pieces of rubber tube and insert a black pin into the end of one tube. Place the tube with the black pin into the top pin on the hydrogen side (with black terminal). Place the other tube firmly onto the top input nozzle on the oxygen side.
2. Fill the syringe with DISTILED water. On the red oxygen side of the reversible fuel cell, connect the syringe to the uncapped tube. Fill the reversible fuel cell until water begins to flow out of the tube. Attach a red plug to the oxygen side tube. Let settle for 3 min.



3. Attach the round cylinders to the cylinder base by pressing downward into round slots and twisting into place. Then add water up to the "0" line.



4. Place inner containers into outer cylinders minding that the gaps are not blocked by inner plastic rims. Make sure the water is still level to the "0" line. If not, remove some water with the syringe so that water level is at "0" line. Cut the remaining piece of long tubing into two pieces of approximately 20 cm length. Connect the two pieces of tubing to the top nozzles on the inner containers. If the tubing is connected to the inner cylinders last there will be no air trapped inside the inner containers.



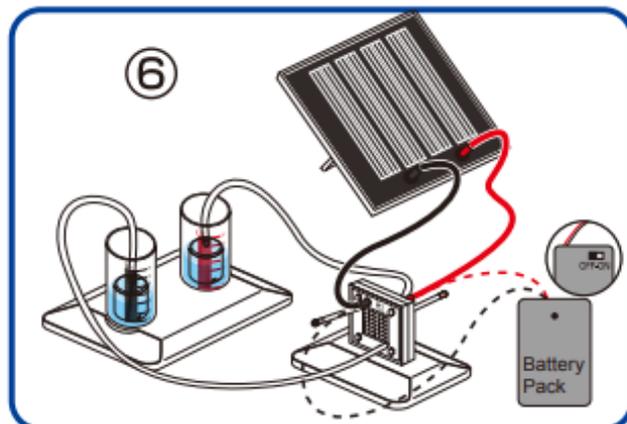
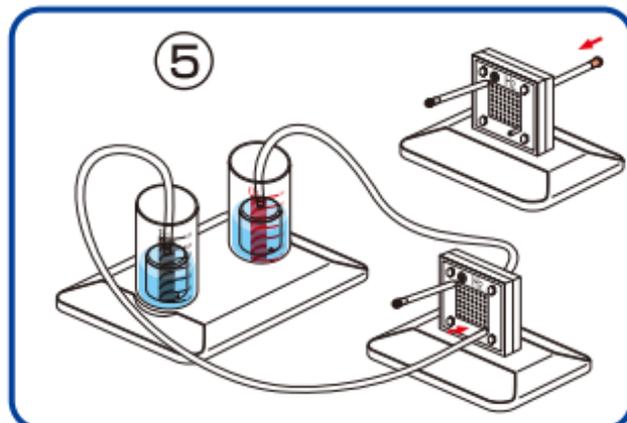
5. Connect the other end of the long tube on the hydrogen side to the bottom end of the black hydrogen side of the reversible fuel cell. Connect the other end of the long tube on the oxygen side to the bottom end of the red oxygen side of the reversible fuel cell.

6. Connect the reversible fuel cell to the solar panel using the corresponding cables and expose to direct sunlight. (Important: make sure connections are correct or permanent damage can occur.)

The system will now start to produce oxygen and hydrogen in the respective cylinders. When bubbles begin to surface in the hydrogen cylinder the cycle is complete. Disconnect the reversible fuel cell.

Procedure for repeated gas production: Reconnect the solar cell to the reversible fuel cell. Disconnect the small plugs from the tubes connected to the nozzles on the reversible fuel cell. This will allow water into the inner cylinders to replace the gasses and reset water levels to "0" line. Re-insert the plugs into the tubes and repeat electrolysis again.

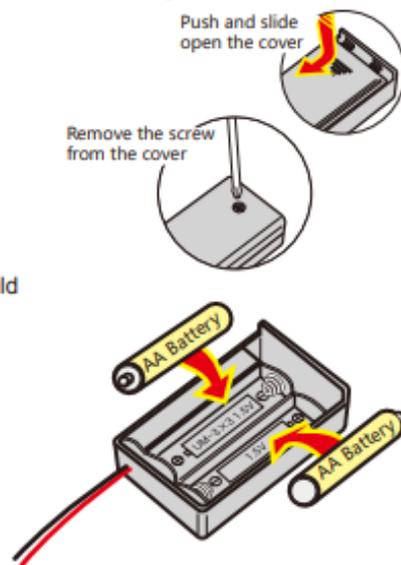
NOTE: You can also use the Battery Pack to Perform Electrolysis (in the case of no sun).



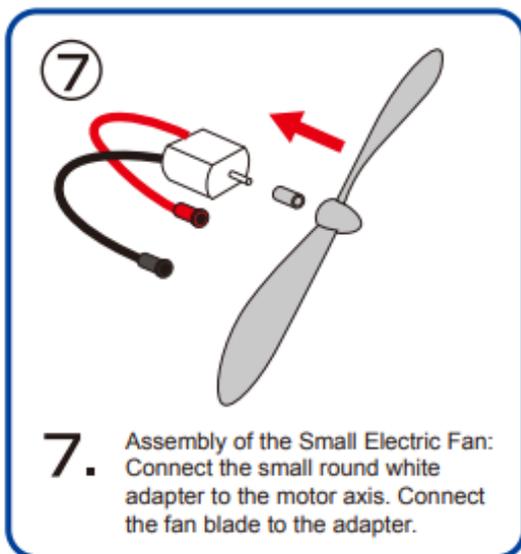
Using the Battery Pack to Perform Electrolysis (in the case of no sun)

Please remove the screw from cover of battery box using a screw driver. Push and slide the cover and open the battery box. Try NOT to touch the cables when you open the cover. Place two AA batteries as indicated. Push and slide the battery box cover to closed position and screw tightly into place using screw driver.

- ※ Make sure the switch on the battery box is in the "off" position before you place the batteries into the box.
- ※ **WARNING:** If the cable is short circuited the batteries inside could become hot and potentially cause burns, melting of parts, or create risk of fire.
- ※ Note: Battery's energy may be consumed after 4-5 times of use.
- ※ Make sure to connect the black cable to the black plug, the red cable to the red plug on the fuel cell.

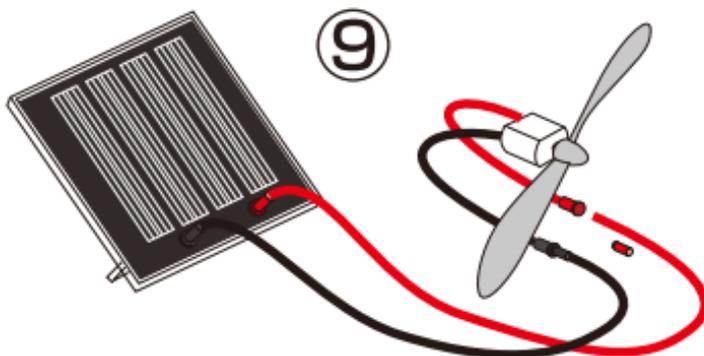
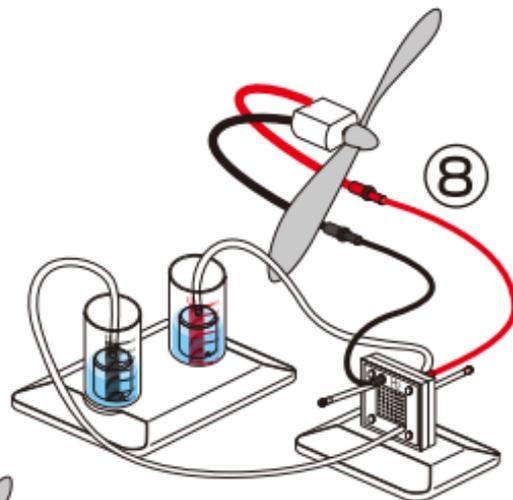


Using a Reversible Fuel Cell to Power the Small Motor with Fan Blade



7. Assembly of the Small Electric Fan: Connect the small round white adapter to the motor axis. Connect the fan blade to the adapter.

8. Connect the motor to the reversible fuel cell using the cables as shown. The motor should begin to turn and consume the hydrogen and oxygen gases stored in the cylinders. The fan may need to be flicked with your finger to start.



Using a Solar Panel to Power the Small Motor with Fan Blade

9. Connect the solar panel to the small motor with fan blade using the cables as shown. The motor should begin to turn if there is sufficient sunlight available. The fan may need to be flicked with your finger to start.

SOLAR HYDROGEN EDUCATION KIT TECHNICAL SUPPORT

1. The water levels do not drop when the gas outlet tubes on both sides of the reversible fuel cell are unplugged.

Solution:

Check whether the holes on the wall of the inner cylinder are blocked. If so, turn the inner cylinder until water enters the holes and fills up the inner cylinder.

2. The reversible fuel cell does not produce hydrogen and/or oxygen.

Solution 1:

Check whether the wires are appropriately connected, and whether there are any loose connections. The reversible fuel cell could be completely destroyed if the red wire of the battery pack is connected to the black jack of the reversible fuel cell.

Solution 2:

Make sure the batteries are inserted with the correct polarity.

Solution 3:

Replace the old batteries with new one in the battery pack.

3. The water electrolysis process slows down.

Solution 1:

Inject water to the oxygen side of the reversible fuel cell by using the syringe and wait for about 3 minutes.

Solution 2:

Replace the old batteries with new one in the battery pack.

4. The motor does not run while there is hydrogen left in the inner container.

Solution:

Unplug the black pin of the short tube on the reversible fuel cell and quickly attach the pin back to the tube to purge out impure gases. You should then see the motor begin to turn again.

5. No hydrogen is produced under the sunlight.

Solution:

If the sunlight is not strong enough electricity will not be created. Use the battery pack provided to perform the electrolysis using the reversible fuel cell.

APÉNDICE H

Código en MATLAB del algoritmo P&O del regulador de carga MPPT.

```
1 function D = MPPT(V,I)
2     Dmax= 0.95;
3     Dmin= 0.5;
4     Dinit= 0.95;
5     deltaD= 1e-4;
6
7     persistent Vold Pold Dold;
8
9     datatype= 'double';
10
11    if isempty(Vold)
12        Vold= 0;
13        Pold= 0;
14        Dold= Dinit;
15    end
16
17    P= V*I;
18    dV= V-Vold;
19    dP= P-Pold;
20
21    if dP ~= 0;
22        if dP < 0;
23            if dV < 0;
24                D= Dold-deltaD;
25            else
26                D= Dold-deltaD;
27            end
28        else
29            if dV < 0;
30                D= Dold+deltaD;
31            else
32                D= Dold-deltaD;
33            end
34        end
35    else
36        D=Dold;
37    end
38
39    if D >= Dmax || D < Dmin
40        D= Dold;
41    end
42
43    Dold= D;
44    Vold= V;
45    Pold= P;
```

APÉNDICE I

Se adjunta imágenes del proceso de elaboración del módulo experimental a escala.

