



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**SISTEMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
ALTERNATIVO BASADO EN  
CELDA DE HIDRÓGENO**

..

Autor:

Prato Díaz, Eduardo Emilio de Jesús

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE MECÁNICA**

**SISTEMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA**  
**ALTERNATIVO BASADO EN**  
**CELDA DE HIDRÓGENO**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de  
**INGENIERO MECÁNICO**

Autor:

Prato Díaz, Eduardo Emilio De Jesús

CI: 27369427

Tutora:

Ing. Alicia de Pizzella

San Diego, marzo 08 de 2024



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
COORDINACIÓN DE PASANTÍA Y TRABAJO DE GRADO

ACTA DE APROBACIÓN

INFORME DE PASANTÍA

TRABAJO DE GRADO

El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe de Pasantía o Trabajo de Grado titulado:

Sistema de energía eléctrica alternativo  
basado en celdas de hidrógeno

Realizado por el (la) Br. Eduardo Prado Díaz

C.I. N° 27369427 cursante de la carrera de Ingeniería

hace constar, después de haber analizado su contenido y oída la exposición oral, considera que el mismo ha sido:

APROBADO

NO APROBADO

El Jurado

[Signature]

Tutor Académico (Coordinador)  
Nombre:  
C.I.:

[Signature]

Jurado  
Nombre: LAURA SAEZ  
C.I.: 4357366

[Signature]

Jurado  
Nombre: Wilson Espinoza  
C.I.: 9885895

Fecha: 10/4/2024





UNIVERSIDAD  
JOSÉ ANTONIO PÁEZ

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA

FI-N-014-2023-2CR-TG

San Diego, 01 de diciembre de 2023

Ciudadano(s):  
PRATO DÍAZ, EDUARDO EMILIO DE JESÚS  
C.I.: 27369427

Presente. -

Cumplo con informarle que la comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería, en su reunión N° 17-2023 de fecha 3/11/2023, aprobó el proyecto de grado titulado:

**SISTEMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA ALTERNATIVO BASADO EN  
CELDAS DE HIDRÓGENO**

Presentado por usted(es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Tutor Académico que lo asesorará en el desarrollo de este proyecto a la profesora Yánez De Pizzella, Alicia Teresa, titular de la cédula de identidad V-4598880.



Atentamente,

**Dra. Laura Aurora Sáenz Palencia**  
Decana de la Facultad de Ingeniería

c.c. Coordinación de Pasantía y Trabajo de Grado de la Facultad de Ingeniería

## ÍNDICE GENERAL

<b>CONTENIDO</b>	<b>pp.</b>
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
RESUMEN .....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO</b>	
<b>I EL PROBLEMA</b>	
1.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.2 Formulación del Problema.....	5
1.3 Objetivos de la Investigación.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Justificación.....	5
1.5 Alcance.....	6
1.6 Limitaciones y/o Delimitaciones.....	6
<b>II MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes.....	7
2.2. Teoría Central de la Investigación.....	8

2.3 Bases Teóricas .....	9
2.3.1. Métodos De Obtención del Hidrógeno.....	9
2.3.1.1. Electrólisis Del Agua.....	10
2.3.1.2. Fotólisis.....	11
2.3.1.3. Reformado De Gas Natural.....	12
2.3.1.4. Gasificación de la biomasa.....	12
2.3.1.5. Nomenclatura del hidrógeno según su método de obtención.....	13
2.3.2. El Hidrógeno Como Combustible.....	14
2.3.2.1. Propiedades Físicas Del Hidrógeno.....	14
2.3.2.2. Propiedades Químicas Del Hidrógeno.....	14
2.3.3. Pilas De Combustible.....	15
2.3.3.1. Funcionamiento, Componentes Y Reacciones.....	16
2.3.3.2. Tipos De Pilas De Combustible.....	17
2.3.3.3. Según Su Aplicación.....	19
2.4 Bases Legales.....	19
2.5 Definición de Términos.....	21

### **III MARCO METODOLÓGICO**

3.1. Paradigma de la Investigación.....	24
3.2 Tipo de Investigación.....	24
3.3 Diseño de la Investigación.....	25
3.4 Nivel de la Investigación.....	25
3.5. Población y Muestra.....	26

3.6. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	26
3.6.1. Observación directa.....	26
3.6.2. Revisión bibliográfica.....	27
3.7. Técnicas de análisis de resultados.....	28
3.8. Fases Metodológicas.....	28
<b>IV RESULTADOS</b>	
4.1. Diagnóstico de las formas de obtención del hidrógeno.....	30
4.1.1. Análisis de la situación actual del hidrógeno en Venezuela....	30
4.1.1.1. Utilización de la matriz Pugh para selección de la alternativa del cuadro FODA.....	33
4.1.2. Generación centralizada de hidrógeno a través de las refinerías existentes en Venezuela.....	35
4.1.3. Generación a través de Electrolizadores.....	37
4.1.4. Evaluación de las alternativas preseleccionadas de obtención de hidrógeno.....	38
4.1.5. Elección del método de obtención de hidrógeno.....	39
4.2. Selección del método con la mejor adaptación al lugar de aplicación ....	41
4.2.1. Identificación de las características de los tipos de pila de combustible.....	41
4.2.2. Limitantes de las zonas residenciales.....	42
4.2.3. Elección del tipo de pila de combustible de hidrógeno.....	46
4.3 Adaptación del sistema de abastecimiento de energía eléctrica .....	48
4.3.1. Pila de combustible.....	48
4.3.2. Electrolizador.....	56
4.3.3. Inversor.....	59
4.3.4. Tanque de almacenamiento de hidrógeno.....	62
4.3.5. Dispositivos de seguridad.....	64

4.3.5.1. Detectores de fuga de hidrógeno.....	64
4.3.5.2. Sistemas de ventilación y extracción.....	68
4.3.6. Montaje del sistema.....	68
4.4. Determinación de la viabilidad técnica, económica y ambiental de utilizar celdas de hidrógeno para abastecer de energía eléctrica sectores residenciales .....	70
4.4.1. Comparativa de la pila de hidrógeno vs batería de litio.....	70
4.4.2. Viabilidad económica.....	75
4.4.3. Viabilidad Ambiental.....	83
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS.....	93
ANEXOS.....	98
Anexo A. Powercell S1	99
Anexo B. Ballard	101
Anexo C. EFOY 5kW	103
Anexo D. Electrolizador h6	105
Anexo E. Electrolizador Interface h6	107
Anexo F. Inversor PowMr	109
Anexo G. Sensor de hidrógeno Honeywell	111

## LISTA DE CUADROS

### DESCRIPCIÓN

CUADRO		pp.
1	Análisis FODA	32
2	Matriz de Pugh	34
3	Electrolizador vs Refinería	39
4	Identificación de características	41
5	Consumo según habitantes	43
6	Potencia según equipos	44
7	Promedio de consumo de la población venezolana	44
8	Criterios ponderados	45
9	Puntuación según criterios ponderados	46
10	Ficha técnica de la Power cell S1	49
11	Ficha técnica Ballard Power System	50
12	Ficha técnica de EFOY 2.5kW	51
13	Selección de sensores	64
14	Amperométricos vs Potenciométricos vs Conductimétricos	65
15	Criterios de sensores electroquímicos	65
16	Ficha técnica sensor Honeywell	66
17	Comparativa del litio vs hidrógeno	70
18	Turbina de gas vs PCH	73
19	Resumen de costos	82
20	Matriz de sostenibilidad	85
21	Progreso del hidrógeno	87

## LISTA DE FIGURAS

### DESCRIPCIÓN

<b>FIGURA</b>		<b>pp.</b>
1	Evaluación de la calidad del servicio	2
2	Frecuencia Apagones	3
3	Reacción química y elementos componentes de la pila de hidrógeno	15
4	Tipos de pilas de combustible	17
5	Diagrama de una celda de combustible de membrana de intercambio de protones	18
6	Nel H series	55
7	Ficha técnica nel Hydrogen	56
8	Ficha técnica nel Hydrogen 2.0	57
9	Inversor solar 5000w	59
10	Especificaciones Inversor Solar PowMr	60
11	Bombonas de hidrógeno	62
12	Detector de gas con sensor Honeywell	66
13	Montaje	67
14	Conjunto Armado	68
15	Conjunto armado dos	68
16	Precios pilas de combustible	76
17	Presupuesto Aircell	77
18	Precio Inversor	78
19	Precio detector	78
20	Precio Bombonas	80



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**

**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**SISTEMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
ALTERNATIVO BASADO EN  
CELDA DE HIDRÓGENO**

**Autor(es):** Eduardo Prato

**Tutor (a):** Ing. Alicia De Pizzella

**Fecha:** marzo de 2024

**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo de grado fue analizar las pilas de combustible de hidrógeno como una alternativa viable y sostenible para la generación de energía en hogares en Valencia, Edo Carabobo. Ya que las alternativas existentes no usan combustibles tan eficientes y no dañinos con el ambiente, como el hidrógeno. Se buscó examinar su funcionamiento, ventajas y desafíos específicos en este contexto, así como evaluar su aplicabilidad en el ámbito residencial. En la revisión bibliográfica se analizó el estado actual de las pilas de combustible de hidrógeno y su relevancia en el contexto energético actual, centrándose en su aplicación en los hogares. Se describió en detalle el funcionamiento de estas celdas y se identificaron las ventajas y desafíos específicos que se presentan al utilizarlas en un entorno residencial. Desde el punto de vista metodológico, el proyecto estuvo basado en el ámbito tipo proyecto factible, sustentado a través de revisión documental y bibliográfica. La población y la muestra vino dada por los diferentes sistemas de generación de energía eléctrica y la muestra por las celdas de hidrógeno generadoras de energía eléctrica aplicables para hogares o zonas residenciales. Los instrumentos de recolección de datos fueron; observación directa y revisión documental. Para terminar, la línea de investigación es ciencias cognitivas y aplicadas. Se logró demostrar la capacidad de las pilas de combustible para abastecer consumos altos de energía, recomendando la generación a gran escala para reducir costos de inversión inicial.

**Descriptor:** Celdas de hidrógeno, Energías alternativas, Pila de combustible



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA**

**SISTEMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
ALTERNATIVO BASADO EN  
CELDA DE HIDRÓGENO**

Autor(es): Eduardo Prato  
Tutor (a): Ing. Alicia De Pizzella  
**Fecha:** marzo de 2024

**ABSTRACT**

The objective of this research project was to analyze hydrogen fuel cells as a viable and sustainable alternative for energy generation in homes in Valencia, Carabobo State. This is motivated by the need for more efficient and environmentally friendly energy sources than currently available alternatives. The study examined the operation, advantages, and specific challenges of hydrogen fuel cells in this context, as well as evaluating their applicability in the residential sector. A literature review was conducted to analyze the current state of hydrogen fuel cells and their relevance in the current energy context, focusing on their application in homes. The operation of these cells was described in detail, and the specific advantages and challenges of using them in a residential setting were identified. Methodologically, the project was based on a feasible project approach, supported by a documentary and bibliographic review. The population and sample were determined by the different electrical power generation systems, and the sample by the hydrogen fuel cells that generate electrical power applicable for homes or residential areas. The data collection instruments were direct observation and documentary review. Finally, the research line is cognitive and applied sciences. The project successfully demonstrated the ability of fuel cells to supply high energy consumption, recommending large-scale generation to reduce initial investment costs.

**Keywords:** Hydrogen fuel cells, energy generation, sustainable energy.

## INTRODUCCIÓN

Las celdas de hidrógeno se presentan como una alternativa prometedora en la generación de energía, ya que ofrecen numerosas ventajas en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. Esta tecnología se encuentra en el centro de atención de la comunidad científica y empresarial debido a su potencial para abordar los desafíos energéticos y ambientales actuales, adicionando la grave situación eléctrica que atraviesa Venezuela.

El propósito de esta investigación es analizar las celdas de hidrógeno como una alternativa viable y sostenible para la generación de energía. Se busca examinar su funcionamiento, ventajas y desafíos, así como evaluar su aplicabilidad en el sector residencial, como en casas y apartamentos. Dicho esto, la postura teórica asumida es enfocarse en las celdas de hidrógeno como una solución energética eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

En cuanto a las conceptualizaciones básicas, se explorarán conceptos clave relacionados con las celdas de hidrógeno, como la electrólisis del agua, la producción de hidrógeno, la conversión electroquímica y la generación de electricidad. Estos conceptos son fundamentales para comprender el funcionamiento de esta tecnología.

Para el desarrollo del presente Trabajo de Grado, se estructuró en cuatro capítulos, con el fin de cumplir las normativas establecidas por la Universidad José Antonio Páez. Dichos capítulos se describen a continuación:

Capítulo I: referido al problema, su planteamiento y formulación, el cual fue desarrollado durante todo el curso de la investigación por medio de los objetivos generales y específicos, así como la justificación del estudio y su alcance.

Capítulo II: se hizo énfasis en los antecedentes, bases teóricas, los fundamentos legales y normativas a considerar, que contribuyen al entendimiento de la investigación.

Capítulo III: sobre el marco metodológico, se planteó la naturaleza de la investigación, la cual, por sus características, se trata de una investigación de proyecto factible con aporte descriptivo y modalidad cuantitativa, de modo que la estrategia metodológica seleccionada sirvió de guía para el desarrollo del Trabajo de Grado. Las técnicas e instrumentos para la recolección de información fueron la observación directa, la revisión documental.

Capítulo IV: en este capítulo se estudiaron y analizaron los resultados en correspondencia con las fases metodológicas desarrolladas.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento Del Problema

En la actualidad, el mundo enfrenta una serie de problemas relacionados con el uso de combustibles fósiles y la quema de carbono en los procesos de generación de energía. Estas prácticas han llevado a la emisión de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, lo que ha contribuido al calentamiento global y al cambio climático. Además, la dependencia de los combustibles fósiles como fuente de energía ha llevado a problemas de escasez, volatilidad en los precios y conflictos geopolíticos.

En Venezuela, país rico en recursos naturales, también se enfrentan problemas relacionados con la generación de energía eléctrica. La infraestructura eléctrica del país ha sufrido años de falta de inversión y mantenimiento, lo que ha resultado en una red eléctrica inestable y propensa a fallas constantes. La ONG (El Comité de Afectados por Apagones) se pronunció destacando que las fallas eléctricas aumentaron un 50% durante el mes de marzo, donde se documentaron 6.043 interrupciones, en relación a febrero cuando 1.994 cortes de luz, en el año 2023, en todo el territorio nacional.

Desde el Observatorio Nacional de Servicios Públicos (2022) con una muestra 4656 encuestas, se presentan los siguientes resultados en las siete ciudades más influyentes del país lo que demuestra el descontento general de la población (ver figura 1 y 2):

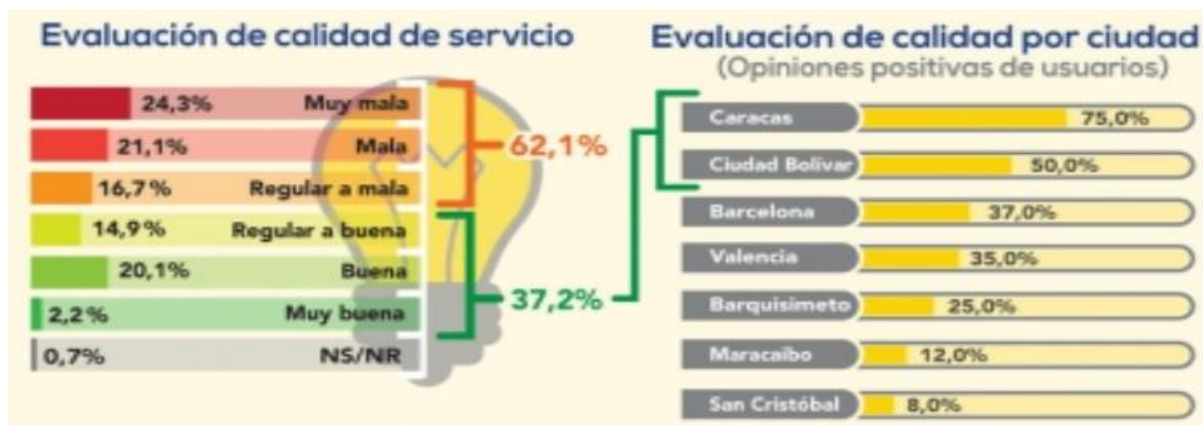


Figura 1: Evaluación de la calidad de servicio

Fuente: Observatorio Nacional de Servicios Públicos (2022)



Figura 2: Frecuencia Apagones

Fuente: Observatorio Nacional de Servicios Públicos (2022)

Carlos Enrique Ñañez, profesor de la Universidad de Carabobo, informó que tienen 25 días a media fase en algunas zonas de San Diego, destacando el impacto negativo que esta situación acarrea a la vida de los ciudadanos. Según Ñañez (2023) “Lo mismo ocurre en Naguanagua, en la gran Valencia, los transformadores se están dañando y al parecer no hay transformadores eso es lo que dicen en la Corporación eléctrica, no dan respuestas por la Ven App”. Adicionalmente agregó Ñañez (2023) “Las fluctuaciones son graves, el 87% de las termoeléctricas no funcionan y dependemos del Guri. Lo cual agrava la crisis de energía en el país”.

Sandy Aveledo en su portal web cuenta que se informó que la Corporación Eléctrica Nacional (Corpoelec) no está enviando suficiente energía desde la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar, conocida como El Guri, por deterioro de la Red Troncal de Transmisión. Los acontecimientos se registran desde agosto de 2023, información transmitida por El Pitazo. Por consiguiente, se dejó de suministrar entre 700 y 900 megavatios desde el Guri por parte de la empresa. Esta situación sería para ayudar a mantener estable el servicio eléctrico del país. Sin embargo, José Aguilar, ingeniero y especialista en sistemas de generación eléctrica, ha alertado sobre el deterioro de la Red Troncal de Transmisión debido a la falta de mantenimiento junto con otros especialistas en el tema.

Según El medio digital.com (2023) “El problema es que no pueden pasar la cantidad que se requiere de la hidroelectricidad que se genera en Guayana por el mal estado en que tienen la red. Se afecta con el aumento de las temperaturas”, datos aportados por El Nacional.

La falta de estabilidad en el servicio eléctrico de Venezuela se debe a diversas causas, entre las principales se encuentran: la mencionada falta de inversión en infraestructura, falta de mantenimiento y capacitación del personal, corrupción y mala gestión, falta de políticas y regulaciones adecuadas, además de problemas en la generación de energía, la cual es notoria debido a la dependencia excesiva de la generación hidroeléctrica y la falta de diversificación en las fuentes de generación que han llevado a una vulnerabilidad ante fenómenos climáticos, como sequías prolongadas, que afectan la disponibilidad de energía.

Por otro lado, la utilización de combustibles fósiles como alternativa de solución conlleva múltiples condicionantes, esto se evidencia ya que la infraestructura petrolera venezolana ha sufrido un deterioro significativo en los últimos años, como resultado, la gasolina en Venezuela contiene altos niveles de azufre y otros contaminantes.

Esto puede generar costos adicionales para los propietarios de equipos de generación eléctrica y contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos, lo que agrava los problemas de calidad del aire y afecta la salud pública.

Por otro lado, la inestabilidad en el servicio eléctrico tiene diversas consecuencias negativas para un país como pérdidas económicas, desalentando la inversión extranjera y afectando el turismo, riesgos para la salud debido a que se requiere electricidad para el funcionamiento de hospitales y centros médicos. Además, en situaciones de calor extremo, la falta de electricidad puede llevar a problemas de deshidratación y golpes de calor.

En definitiva, al denotar una crisis climática mundial y sumado a esto la situación adversa que presenta el país, donde la inversión de recuperación en los sistemas presentes es elevada, se abre un campo de posibilidades de aplicar nuevas tecnologías en concordancia con la época y rentabilidad a largo plazo.

## **1.2. Formulación Del Problema**

¿Qué alternativa de energía eléctrica podría disminuir la deficiencia energética en hogares en Valencia, Carabobo?

## **1.3. Objetivos de la Investigación**

### **1.3.1. Objetivo General**

Aplicar celdas de hidrógeno para suministro de energía eléctrica a hogares ubicados en Valencia, Estado Carabobo.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Diagnosticar las formas de obtención del hidrógeno.
- Seleccionar el método con la mejor adaptación al lugar de aplicación.
- Adaptar el sistema de abastecimiento de energía eléctrica.
- Determinación de la viabilidad técnica, económica y ambiental de utilizar celdas de hidrógeno para abastecer de energía eléctrica sectores residenciales.

## **1.4. Justificación De La Investigación**

La iniciativa parte de la necesidad inminente de cambiar los estándares bajo los que se trabaja en la actualidad, por las mencionadas consecuencias que traen consigo, además de los numerosos beneficios que engloba la utilización de una energía la cual se abastece del elemento químico de mayor abundancia en el planeta. Dichos beneficios juegan un papel fundamental en cada uno de los criterios que se mencionan a continuación:

Desde lo social al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire se mejora la salud y se reduce el riesgo de enfermedades respiratorias, además contribuyen a la mitigación del cambio climático y a la conservación del medio ambiente. Además, el hidrógeno puede ser producido a partir de fuentes renovables como la energía solar o eólica, lo que potencia aún más su carácter sostenible.

En cuanto a las implicaciones prácticas la generación de energía puede brindar soluciones descentralizadas y autónomas, especialmente en zonas remotas o con dificultades de acceso a la red eléctrica. Las cuales permiten avanzar en el conocimiento científico y tecnológico en este campo. Se pueden explorar nuevas técnicas de producción, almacenamiento y aplicación del hidrógeno, así como analizar su comportamiento en diferentes condiciones y su eficiencia energética.

Cabe destacar que estas metodologías pueden ser transferibles a otros campos de estudio, ampliando su utilidad y aplicabilidad. Es una tecnología emergente y en constante desarrollo. Indagar en este campo implica estar a la vanguardia de la innovación y contribuir al avance de soluciones energéticas más sostenibles y eficientes. Además, se ha impulsado el interés en tecnologías limpias y renovables. El mercado de las celdas de hidrógeno presenta un potencial significativo, ya que su aplicación puede ser diversa y abarcar diferentes hogares del sector.

### **1.5. Alcance**

La presente investigación busca diseñar un sistema de producción de energía limpia y alternativa a los servicios públicos tradicionales, orientado principalmente a mejorar la calidad de vida de todas las personas que padecen de los simultáneos cortes de electricidad, cumpliendo los requisitos de seguridad, y eficiencia para otorgar una experiencia congruente de acuerdo al lugar donde se desea aplicar, en este caso en zonas residenciales. Se debe tomar en cuenta que no se evaluarán los costos de los métodos de obtención del hidrógeno y que la aplicabilidad del mismo será para zonas residenciales como alternativa secundaria de suministro de energía.

### **1.6. Limitaciones y/o Delimitaciones**

La aplicación del sistema se limita según los altos costos que conlleva su aplicación, en relación a la capacidad monetaria promedio de adquisición de la población venezolana. Adicionalmente está contemplada para uso residencial y doméstico.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

Tamayo y Tamayo (2007) definen los antecedentes como el proceso que "consiste en el análisis de investigaciones iguales o similares relacionadas en nuestro campo de estudio" (p. 99). Igualmente, los autores mencionados también señalan que los antecedentes son aquellas investigaciones teóricas anteriores semejantes al tema de estudio que el investigador debe indagar con el fin de recopilar información de la misma.

A forma de comenzar, como primer antecedente se tiene a, Espinoza M. y Jaimes A. (2023) que titula su trabajo **“Evaluación teórica de la obtención del hidrógeno verde mediante la foto-electrocatalisis como modelo híbrido de transición energética en Colombia”** para el título de ingeniero en petróleo en Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. El objetivo de esta investigación fue el análisis conceptual del uso de la foto electrocatalisis como modelo híbrido en la obtención de hidrógeno verde, basado en las proyecciones y objetivos planteados en el Plan Energético para el desarrollo sostenible en Colombia y guarda relación con el trabajo presentado debido a que es el punto de partida para la utilización de la energía en cuestión, y su aplicación está centrada en un contexto similar en relación a la ubicación geográfica de la región.

Como segundo trabajo considerado se tiene a Robina A. (2019) titulado: **"Estudio de materiales aptos para almacenamiento de hidrógeno "** para optar por el título de Doctor en ciencia y tecnología de los materiales, en la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. La relación de esta investigación está situada en el obstáculo más grande del hidrógeno para ser utilizado, y es su baja densidad, lo que se traduce en una gran problemática para su almacenamiento, por ello, esta investigación con el objetivo de diseñar una solución bajo los estudios de las alternativas existentes nos aporta información relevante y que se relaciona con el objeto de estudio de este trabajo.

Tomando en consideración el trabajo de Bielsa A (2017) titulado **"Caracterización y adquisición del comportamiento de una celda de combustible para la valoración de la eficiencia energética en un motor eléctrico a escala”** optando por el título de ingeniería electrónica Industrial y automática de la Universidad Politécnica de Catalunya, en Barcelona,

España. Dicha investigación cuenta con pruebas experimentales que permiten ver el desenvolvimiento de la energía y funcionan como parámetro y muestra para aplicar optimizaciones basadas en los resultados obtenidos, además de la visualización de los datos obtenidos de forma automática, a través de un Arduino encaja de manera óptima debido a que el rango de aplicación en hogares requiere de una fácil visualización para las personas que manejen el equipo o necesiten ver el correcto funcionamiento del mismo.

En consecuencia, Reyes O (2016) que titula su trabajo como **“Generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno obtenido por medio de hidrólisis”** para optar por el título de Ingeniero Eléctrico del Instituto Politécnico Nacional, México DF, México. El objetivo de esta investigación fue abastecer de energía un taller de máquinas rotatorias mediante energía generada a través del hidrógeno obtenido por electrólisis, utilizando un motor de combustión interna. Dicha investigación se vincula al trabajo debido a que conlleva a estudiar las propiedades químicas del hidrógeno y conocer el comportamiento como combustible.

Para acotar información relacionada al funcionamiento, se encuentra a López, M (2016) en el artículo científico: **"State-of-the-art review on hydrogen fuel cells for residential applications"**. Presentado y validado por el Institute of Sustainable Energy Technology, University of Nottingham, NG7 2RD, UK. El objetivo de esta investigación fue estudiar el comportamiento de celdas de combustible de hidrógeno en entornos residenciales, y su relación radica en el estudio exhaustivo de las celdas, y cómo funcionan a través de CHP, es decir, utilizando el calor generado por el combustible para aprovecharlo al final del proceso energético, haciéndolo más eficiente.

## **2.2. Teoría Central De La Investigación**

### **La Teoría Electroquímica**

La teoría electroquímica proporciona los fundamentos para comprender cómo se llevan a cabo las reacciones generadas para la obtención de energía, cómo se mueven los electrones y los iones a través del electrolito, y cómo se puede optimizar el diseño de la pila de combustible para maximizar su eficiencia y rendimiento. Además, la teoría electroquímica también abarca conceptos como la cinética de las reacciones, la transferencia de masa y las propiedades de los materiales utilizados en la pila de combustible. Donde se destaca la diferencia entre procesos similares pero inversos, esta explica que, si las reacciones químicas son provocadas por una diferencia de potencial aplicada externamente, se hace referencia a una electrólisis. En cambio, si la diferencia de

potencial eléctrico es creada como consecuencia de la reacción química, se conoce como un "acumulador de energía eléctrica", también llamado batería o celda galvánica. Las reacciones químicas en las que se produce una transferencia de electrones entre moléculas se conocen como reacciones redox, y su importancia en la electroquímica es vital, pues mediante este tipo de reacciones se llevan a cabo los procesos que generan electricidad o, en caso contrario, son producidos como consecuencia de ella.

Hay varias aplicaciones electroquímicas importantes en el marco de la naturaleza y de la industria. La generación de energía química en la fotosíntesis es también un proceso electroquímico, así como la producción de metales como aluminio y titanio y en el proceso de galvanización con metales, lo cual es relevante debido a que el titanio es uno de los principales materiales usados para generar la reacción existente en las celdas de combustible de hidrógeno.

### **2.3. Bases Teóricas**

En la investigación es necesario abordar ciertos conceptos y definiciones para un entendimiento y enfoque más completo del tema para así obtener el sustento teórico para la implementación de la investigación. Según Arias (2012) “Las bases teóricas implican un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adoptado, para sustentar o explicar el problema planteado” (p. 107). Los conceptos son los siguientes:

#### **2.3.1. Métodos De Obtención del Hidrógeno**

Aunque el hidrógeno es abundante en el universo, el hidrógeno libre no se encuentra fácilmente en la Tierra. Aquí se encuentra unido a moléculas, las más abundantes de las cuales son el agua ( $H_2O$ ) y los hidrocarburos, especialmente el metano ( $CH_4$ ).

Para obtener hidrógeno libre, las moléculas que lo contienen, como el agua ( $H_2O$ ) o el metano ( $CH_4$ ), deben dividirse. Este proceso requiere un aporte de energía, que luego puede recuperarse al recombinar el hidrógeno con oxígeno para producir agua. Es por esta razón que el hidrógeno se considera un vector energético y no una fuente de energía primaria: no es una fuente natural de energía, sino un medio para almacenarla y aprovecharla. La energía necesaria para separar el hidrógeno de otras moléculas puede provenir de diferentes fuentes, como la electricidad renovable, la energía solar o los combustibles fósiles. La elección del método de producción dependerá de diversos factores, como la disponibilidad de recursos, la infraestructura existente y las políticas ambientales. Los métodos que producen hidrógeno verde, es decir, que no generan emisiones de gases de efecto invernadero, son:

### **2.3.1.1. Electrólisis Del Agua**

La electrólisis del agua es la descomposición del agua ( $H_2O$ ) en los gases oxígeno ( $O_2$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ) por medio de una corriente eléctrica continua, por una fuente de alimentación, una batería o una pila, que se conecta mediante electrodos al agua. Se basa en distintos métodos como:

#### **Voltámetro de Hofmann**

El voltámetro de Hofmann, un dispositivo simple pero efectivo, se emplea como célula electrolítica para realizar la electrólisis del agua a pequeña escala. Consta de tres tubos cilíndricos de vidrio unidos: un tubo vertical central abierto en la parte superior para facilitar la adición de agua y electrolito, y dos tubos laterales que contienen electrodos de platino conectados a los terminales positivo y negativo de una fuente de corriente continua.

Al pasar la corriente por el voltámetro, se produce la descomposición del agua en sus componentes gaseosos: oxígeno ( $O_2$ ) en el ánodo (electrodo positivo) e hidrógeno ( $H_2$ ) en el cátodo (electrodo negativo). Estos gases, debido a su menor densidad con respecto al agua, ascienden por los tubos desplazando el agua superior, permitiendo su recolección mediante una llave de paso. El voltámetro de Hofmann, por su simplicidad y facilidad de uso, es una herramienta ideal para demostraciones científicas y para familiarizarse con los principios básicos de la electrólisis del agua.

#### **Electrólisis a alta presión**

La electrólisis a alta presión (HPE) se distingue de la electrólisis convencional por su capacidad de producir hidrógeno comprimido directamente. Este proceso descompone el agua ( $H_2O$ ) en oxígeno ( $O_2$ ) e hidrógeno gaseoso ( $H_2$ ) mediante una corriente eléctrica, pero lo hace a una presión elevada, entre 12 y 20 MPa (120-200 bar) y a una temperatura de 70 °C. La principal ventaja de la HPE reside en la eliminación del compresor de hidrógeno externo. Al presurizar el hidrógeno dentro del electrolizador, se ahorra energía y se reduce la complejidad del proceso, con un consumo medio de energía para la compresión interna de solo un 3%. En esencia se trata de hidrógeno comprimido sin compresor externo.

## **PEM**

Los electrolizadores PEM (membrana de intercambio de protones) se distinguen por su capacidad de generar hidrógeno y oxígeno bajo demanda. Estos equipos compactos y altamente eficientes son capaces de operar de forma autónoma, lo que los convierte en una solución ideal para diversas aplicaciones.

Su diseño modular permite una fácil adaptación a diferentes necesidades de producción, desde pequeñas cantidades para uso individual hasta sistemas a gran escala para aplicaciones industriales. Además, su eficiencia energética y su bajo impacto ambiental los convierten en una opción atractiva para la producción de hidrógeno verde.

### **2.3.1.2. Fotólisis**

La fotólisis es un proceso que utiliza la energía solar para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de un dispositivo llamado célula fotovoltaica, que consta de dos electrodos sumergidos en agua y expuestos a la luz solar.

La luz solar, al incidir sobre la célula fotovoltaica, provoca la excitación de los electrones en los electrodos debido a la energía de los fotones. Estos electrones excitados se desplazan hacia el electrodo positivo, conocido como ánodo, mientras que los iones de hidrógeno se desplazan hacia el electrodo negativo, conocido como cátodo.

En el cátodo, los iones de hidrógeno, al recibir los electrones, se transforman en átomos de hidrógeno. Estos átomos de hidrógeno luego se combinan para formar moléculas de hidrógeno gaseoso ( $H_2$ ). Mientras tanto, en el ánodo, los electrones liberados por los electrodos se combinan con los iones de oxígeno presentes en el agua para formar moléculas de oxígeno gaseoso ( $O_2$ ).

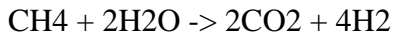
El hidrógeno producido durante la fotólisis puede ser recolectado y utilizado como una fuente de energía limpia y renovable. El oxígeno liberado durante el proceso también puede ser utilizado en aplicaciones industriales o liberado al ambiente.

Es importante destacar que la eficiencia de la fotólisis depende de varios factores, como la intensidad de la luz solar, la calidad de los materiales utilizados en la célula fotovoltaica y las condiciones de operación.

No obstante, los métodos que queman combustibles fósiles para producir hidrógeno son:

### **2.3.1.3. Reformado De Gas Natural**

El vapor y el gas natural, previamente purificados para eliminar impurezas, se calientan juntos a alta presión (900°C) en presencia de un catalizador de níquel. Esta reacción produce una mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno conocida como syngas. Posteriormente, el syngas se somete a una reacción de cambio de gas a agua para obtener más hidrógeno y dióxido de carbono. La ecuación química global del proceso es:



Tanto el metano como el agua aportan 2 moléculas de hidrógeno cada uno. El hidrógeno se separa de la mezcla gaseosa mediante un proceso de adsorción por oscilación de presión, lo que incrementa la energía requerida y, por ende, las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **2.3.1.4 Gasificación De Biomasa**

Si bien la biomasa se considera una fuente renovable, la gasificación en este proceso depende de la combustión de combustibles fósiles para generar el calor necesario. Esto conlleva la emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono.

La gasificación en sí misma es un proceso termoquímico que transforma la biomasa a temperaturas superiores a 700°C con un suministro controlado de oxígeno o vapor. El resultado es un gas sintético conocido como syngas, compuesto por hidrógeno que puede ser separado y purificado. Las tres etapas que componen el proceso de gasificación son:

- Secado: la humedad del material orgánico se evapora.
- Pirólisis: descomposición térmica en ausencia de oxígeno.
- Gasificación: oxidación parcial de los productos de la pirólisis.

La proporción de hidrógeno que se puede obtener del gas de síntesis generado es de alrededor del 40%. Este proceso es menos intensivo en emisiones de carbono que la producción de hidrógeno gris o azul a partir de gas natural.

Además, resulta más económico que la electrólisis utilizada para el hidrógeno verde, al menos por el momento, y permite la producción continua de energía gracias a la disponibilidad de la biomasa. Sin embargo, no deja de ser un proceso complejo que involucra una gran cantidad de reacciones y genera productos no deseados como el monóxido de carbono (CO) y el coque. Cabe destacar que el proceso requiere condiciones severas de reacción, seguidas de pasos adicionales de separación y purificación para obtener hidrógeno de alta calidad. Esto complica su implementación en industrias de pequeño tamaño.

### 2.3.1.5. Nomenclatura del hidrógeno según su método de obtención

El hidrógeno, el elemento más ligero y abundante del universo, no se encuentra en la naturaleza como gas libre. Siempre está enlazado a otras moléculas, como el agua (H<sub>2</sub>O) o el metano (CH<sub>4</sub>). Para obtenerlo, se necesitan procesos específicos que rompen estos enlaces. La forma en que se obtiene el hidrógeno determina su impacto ambiental. Es por eso que se le asigna un color, como una etiqueta intuitiva, para identificar el método de producción y su huella ambiental. El uso de colores para nombrar el hidrógeno no se refiere al color del gas en sí, sino que simboliza de manera intuitiva el impacto ambiental asociado a su producción:

- Colores limpios: verde, azul, turquesa, rosa y violeta.
- Colores contaminantes: gris, negro y marrón.

**Hidrógeno gris:** Se obtiene a partir de combustibles fósiles como el gas natural o el carbón, mediante procesos como la reformación con vapor o la gasificación. Es el método de producción de hidrógeno más común y económico, pero también el más contaminante, ya que genera emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Hidrógeno azul:** Se obtiene a partir de gas natural utilizando la tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CAC). Este método reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> del proceso de producción de hidrógeno, pero aún no está ampliamente disponible.

**Hidrógeno verde:** Se obtiene a partir de fuentes de energía renovables como la energía solar, eólica o hidráulica, mediante electrólisis del agua. Es el método de producción de hidrógeno más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, pero también el más costoso.

**Hidrógeno marrón:** Es un método de producción de hidrógeno muy contaminante, similar al hidrógeno gris, generado a través de la gasificación del carbón

**Hidrógeno negro:** Se obtiene a partir del carbón por pirólisis. Es un método de producción de hidrógeno menos contaminante que el hidrógeno marrón, pero aún no está ampliamente disponible.

**Hidrógeno turquesa:** Se obtiene a partir de la pirólisis del metano con energía nuclear. Es un método de producción de hidrógeno libre de emisiones de CO<sub>2</sub>, pero aún está en fase de desarrollo.

**Hidrógeno rosa:** Se obtiene a partir de la electrólisis del agua utilizando energía nuclear. Es un método de producción de hidrógeno libre de emisiones de CO<sub>2</sub>, pero aún está en fase de desarrollo.

**Hidrógeno violeta:** Se obtiene a partir de la electrólisis del agua utilizando energía solar fotovoltaica de alta concentración. Es un método de producción de hidrógeno en desarrollo, con un alto potencial de eficiencia.

**Hidrógeno blanco:** Se refiere a cualquier tipo de hidrógeno que se produce sin emisiones de CO<sub>2</sub>. Es un término genérico que abarca el hidrógeno verde, azul, turquesa, rosa y violeta.

**Hidrógeno amarillo:** Se refiere a cualquier tipo de hidrógeno que se produce con emisiones de CO<sub>2</sub>. Es un término genérico que abarca el hidrógeno gris, marrón y negro.

### **2.3.2. El Hidrógeno Como Combustible**

#### **2.3.2.1. Propiedades Físicas Del Hidrógeno**

El hidrógeno, segundo elemento de la tabla periódica, posee los puntos de ebullición y fusión más bajos después del helio. Se encuentra en estado líquido por debajo de  $-252,77^{\circ}\text{C}$  y en estado sólido por debajo de  $-259,2^{\circ}\text{C}$  a presión atmosférica. Estas temperaturas son extremadamente bajas, considerándose criogénicas aquellas por debajo de  $-73^{\circ}\text{C}$ , por lo que el hidrógeno se clasifica como líquido criogénico.

El hidrógeno puro es inodoro, incoloro e insípido, haciéndolo casi invisible en caso de fuga a la luz del día. El hidrógeno obtenido a partir de combustibles fósiles en algunos casos y tomando en cuenta la interferencia del usuario puede contener nitrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y otros gases en diferentes proporciones, también inodoros, incoloros e insípidos.

Si bien el hidrógeno no es tóxico, puede actuar como asfixiante al desplazar el oxígeno del aire. Se debe tener precaución al manipularlo en espacios cerrados, ya que una fuga podría causar la muerte por asfixia.

#### **2.3.2.2. Propiedades Químicas Del Hidrógeno**

Las llamas del hidrógeno, casi imperceptibles a la luz del día por su tenue color azul claro y la ausencia de hollín, se tornan más visibles con la presencia de humedad o impurezas en el aire. En la oscuridad o bajo luz artificial, su visibilidad aumenta considerablemente. Si bien la llama en sí puede ser difícil de detectar, la combustión de hidrógeno sí se puede observar por las "ondulaciones" que produce y la radiación termal, especialmente en grandes fuegos.

Los equipos de emergencia, conscientes de la dificultad de detectar las llamas de hidrógeno a la luz del día, utilizan escobas de maíz para detectarlas. El maíz, al entrar en contacto con el hidrógeno caliente, produce un característico sonido chisporroteante que alerta a los equipos de la presencia de fuego. En el caso de los incendios de hidrógeno solo ocurren en zonas donde se haya

producido una fuga y el gas se mezcle con el aire en las concentraciones suficientes. A diferencia de los incendios de gasolina, que pueden extenderse de forma horizontal, los de hidrógeno se caracterizan por ser verticales y localizados. Esto se debe a que el hidrógeno se eleva rápidamente por su alta difusividad y flotabilidad.

Aunque el hidrógeno quema de forma más intensa que la gasolina, lo hace durante un período de tiempo más corto. Además, mientras que la combustión de la gasolina genera humos tóxicos, al quemarse el hidrógeno, este no emitirá ningún tipo de elemento nocivo al ambiente. Por consiguiente, si bien presentan desafíos en su detección, ofrecen ventajas en términos de seguridad y emisiones en comparación con los combustibles fósiles.

### 2.3.3. Pilas De Combustible

Una pila de combustible, también conocida como celda de combustible, es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de un combustible en electricidad. A diferencia de las baterías, que almacenan energía química, las pilas de combustible requieren un flujo constante de combustible para funcionar. (ver figura 3)

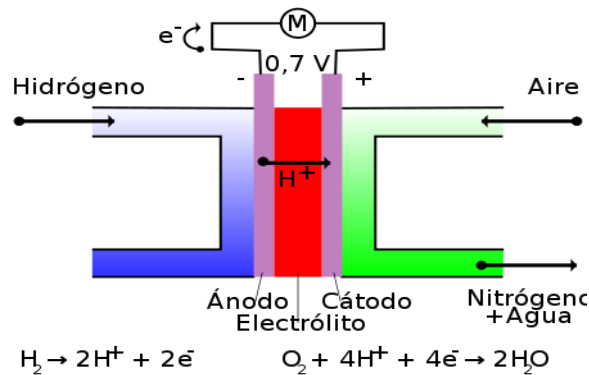


Figura 3. Reacción química y elementos componentes de la pila de hidrógeno.  
Fuente: Handige Harry (2008)

En la figura 3, se muestra una celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC). Los gases de hidrógeno y oxígeno ingresan a la celda a través de canales separados. El hidrógeno se oxida en el ánodo y el oxígeno se reduce en el cátodo. Los protones generados en el ánodo atraviesan el electrolito hacia el cátodo, donde se combinan con el oxígeno y los electrones para formar agua. La corriente eléctrica generada por la reacción química fluye por el circuito externo.

### 2.3.3.1. Funcionamiento, Componentes y Reacciones.

Las celdas de combustible, compuestas por un ánodo, un cátodo y un electrolito, funcionan a través de la interacción del hidrógeno y el oxígeno. El hidrógeno se introduce en el ánodo y el oxígeno en el cátodo, separados por la membrana electrolítica. Los electrones del hidrógeno fluyen por un circuito externo generando una corriente eléctrica que alimenta los dispositivos. En el cátodo, el oxígeno se combina con protones y electrones para formar agua, liberando energía en forma de calor.

Las partes que componen la pila de combustible son:

Electrodos:

- Ánodo: Donde se reduce el H<sub>2</sub> en dos protones H<sup>+</sup>.
- Cátodo: Donde reaccionan los protones H<sup>+</sup> y O<sub>2</sub>.

Electrolito:

- Separa los gases.
- Permite el paso de iones H<sup>+</sup> al cátodo.
- Separa los electrones.

Placas bipolares:

- Separan las celdas.
- “Conducen” los gases.
- Evacúan H<sub>2</sub>O.

Las reacciones que tienen lugar en cada uno de los electrodos son:

- Reacción en el ánodo:  $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
- Reacción en el cátodo:  $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
- Reacción global:  $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

### 2.3.3.2. Tipos De Pilas De Combustible

Las pilas de combustible se clasifican principalmente por el tipo de electrolito que utilizan. El electrolito determina las reacciones químicas que ocurren en la celda, los catalizadores necesarios, la temperatura de operación y el combustible compatible. Estas características también influyen en las aplicaciones para las que la pila es más adecuada. Existen diversos tipos de pilas de combustible, cada uno con sus ventajas, características y aplicaciones (ver figura 4):

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolito	Membrana de Polímero Sólido	Solución Alcalina	Ácido Fosfórico	Carbonatos Fundidos	Óxido Sólido	Membrana de Polímero Sólido
Temperatura Operación (°C)	60 - 80	100 - 120	200 - 250	600 - 700	800 - 1000	50 - 120
Rango potencia	5 - 250 kW	5 - 150 kW	50 kW - 11 MW	100 kW - 2 MW	100 - 250 kW	5 kW
Ventajas	Baja Temperatura Arranque rápido Baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida	Acepta H <sub>2</sub> impuro	Reformado interno Cogeneración	Reformado interno Cogeneración	No necesita reformador de combustible
Aplicaciones	Transporte Portátiles Residencial	Espaciales	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor	Portátiles

Figura 4: Tipos de pilas de combustible  
Fuente: Centro Nacional de Hidrógeno (2024)

Como se visualiza en la figura 4, para la aplicación en zonas residenciales entran en competencia la PEMFC o DMFC, incluso pueden ser portátiles lo que permite su transporte de manera segura y económica.

Las pilas PEMFC se construyen a partir de conjuntos de electrodos de membrana (MEA) que integran los electrodos, el electrolito, el catalizador y las capas de difusión de gases. Una tinta de catalizador, carbono y electrodo se aplica sobre el electrolito sólido, y papel de carbono se prensa en caliente a ambos lados para proteger el interior de la célula y actuar como electrodos. El núcleo de la célula es el triple límite de fase (TPB), donde se mezclan el electrolito, el catalizador y los reactivos (como se observa en la figura 5), y donde se producen las reacciones de la célula.

Es crucial que la membrana no conduzca la electricidad para evitar que las medias reacciones se mezclen. Se buscan temperaturas de funcionamiento superiores a 100 °C para que el agua, como subproducto, se vaporice y la gestión del agua sea menos crítica en el diseño de la célula.

La membrana de una pila de combustible juega un papel fundamental al permitir el paso de protones (H<sup>+</sup>) pero no de electrones, lo que evita un cortocircuito. Su impermeabilidad a los gases es vital para prevenir el "cruce de gases". Además, debe ser resistente al ambiente reductor del cátodo y al ambiente oxidativo del ánodo.

La descomposición de la molécula de hidrógeno con catalizadores de platino es sencilla, pero la separación del oxígeno presenta dificultades, lo que genera pérdidas eléctricas. La búsqueda de un catalizador adecuado para este proceso continúa, siendo el platino la mejor opción disponible hasta ahora. (ver figura 5)

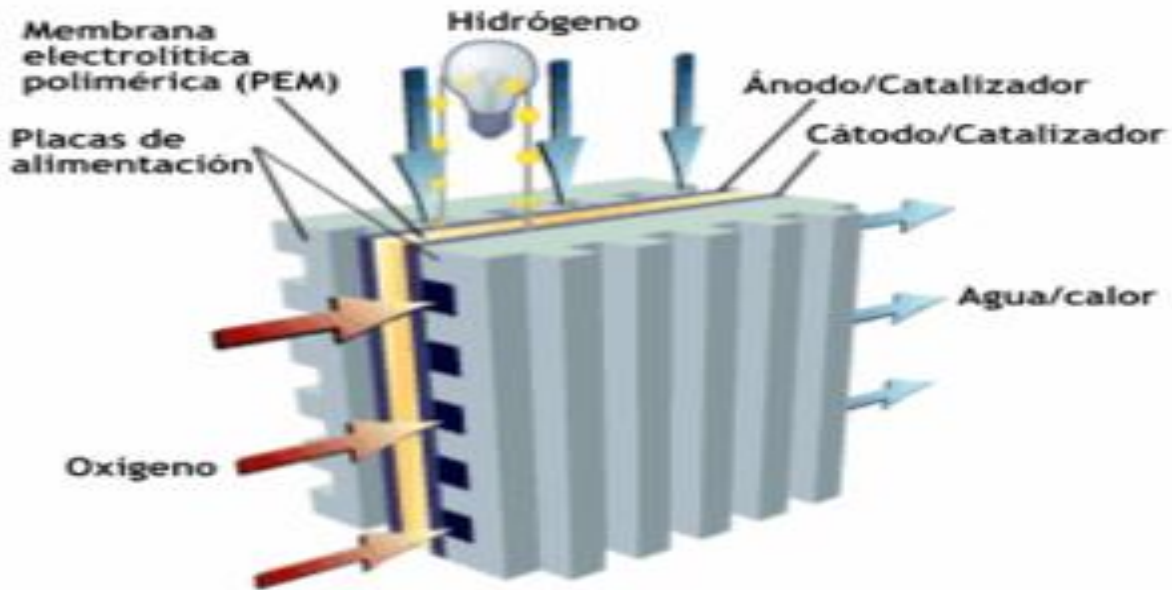


Figura 5. Diagrama de una celda de combustible de membrana de intercambio de protones

Fuente: Senda1234 (2023)

### **2.3.3.3. Según Su Aplicación**

Portátiles: Orientadas a pequeños dispositivos electrónicos cada vez más presentes en nuestro entorno, como ordenadores, smartphones y pequeños electrodomésticos.

Estacionarias: Utilizan el hidrógeno como sistema de almacenamiento para generar electricidad y calor en empresas, hospitales, zonas residenciales y como generadores de emergencia en caso de fallos en el suministro principal.

Transporte: Se contempla el uso de hidrógeno como combustible en pilas de combustible para vehículos eléctricos de todo tipo (coches, autobuses, barcos), con prototipos y modelos de prueba cada vez más frecuentes. Se estima la llegada de estos vehículos en el mercado en los próximos años.

## **2.4. Bases Legales**

1. Ley Orgánica del Ambiente: Esta ley establece los principios y disposiciones para la protección, conservación y mejoramiento del ambiente en Venezuela. Podría ser relevante para promover el uso del hidrógeno como una alternativa limpia y sostenible en el sector energético.

2. Ley de Promoción y Desarrollo de la Industria Petroquímica: Esta ley tiene como objetivo promover la inversión y el desarrollo de la industria petroquímica en Venezuela. Podría ser relevante para impulsar la producción y utilización del hidrógeno como un subproducto de la industria petrolera.

3. Ley Orgánica de Hidrocarburos Gaseosos. Esta ley regula la exploración, producción, transporte, almacenamiento y comercialización de hidrocarburos gaseosos, incluyendo el hidrógeno. En ella se establecen normas de seguridad para la industria del gas, incluyendo requisitos técnicos y de protección ambiental.

4. Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social: Este plan establece las políticas y estrategias de desarrollo económico y social en Venezuela. Podría ser relevante investigar si incluye medidas o metas relacionadas con la promoción del uso del hidrógeno como combustible.

5. Ley Orgánica del Sistema Eléctrico Nacional (LOSEN):

**Artículo 10:** Define la generación distribuida como la "actividad realizada por personas naturales o jurídicas que, a partir de fuentes de energía renovable o no renovable, generan energía eléctrica para su propio consumo o para su venta a terceros, inyectándole a la red de distribución a través de un punto de conexión".

**Artículo 71:** Establece que la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CORPOELEC) será la responsable de "regular las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, así como la prestación de los servicios conexos".

**Artículo 73:** Define las tarifas de energía eléctrica como "los precios que se cobran por la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica".

6. Ley de Energías Alternativas y Renovables:

**Artículo 2:** Define las energías alternativas y renovables como "aquellas que provienen de fuentes no convencionales, tales como la solar, eólica, geotérmica, biomasa, mareomotriz, de los océanos, de las olas, del hidrógeno y otras que se determinen por vía reglamentaria".

**Artículo 5:** Establece que el Estado promoverá el desarrollo y uso de las energías alternativas y renovables en el país.

**Artículo 11:** Define los incentivos para la promoción de las energías alternativas y renovables, incluyendo exenciones fiscales, créditos fiscales y acceso a financiamiento preferencial.

7. Resolución N° 009 del Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica: Esta resolución establece los requisitos técnicos para la conexión de sistemas de generación distribuida a la red eléctrica nacional.

**Artículo 1:** La presente Resolución tiene por objeto regular la reducción del consumo de energía eléctrica de aquellos usuarios sujetos a las tarifas servicios generales 1, 2, 3 y 4 y cuya Demanda Asignada Contratada (DAC) exceda los 25 kVA, en un veinte por ciento (20%) y establecer las estrategias y lineamientos necesarios para garantizar el uso racional y eficiente de la Energía Eléctrica en las Áreas y Zonas Servidas por la Corporación Eléctrica Nacional S.A. (CORPOELEC) a través de C.A la Electricidad de Caracas.

**Artículo 2:** A los fines de la presente Resolución se entiende por: Altos Consumidores Sector Industrial, Comercial y Oficial: Aquellas personas públicas o privadas sujetas a las tarifas servicios generales 1, 2, 3 y 4 y cuya Demanda Asignada Contratada (DAC) exceda los 25 kVA, de acuerdo con lo previsto en el Artículo 14 numerales 14.4; 14.5; 14.6; 14.7 de la Resolución Conjunta Nro. 089/955, publicada en Gaceta Oficial Nro. 37.415, de fecha 03 de abril de 2002, emanada de los Ministerios de Producción y el Comercio y Energía y Minas, mediante la cual se fijan las Tarifas Máximas que aplicarán las empresas eléctricas que en ella se mencionan, a los consumos de energía eléctrica. Altos Consumidores del Sector Residencial: Se considera como altos

consumidores de energía eléctrica del sector residencial a todos aquellos usuarios con consumos de energía superiores a 500 kWh al mes.

8. Ordenanza sobre el uso del suelo y la zonificación del Municipio Valencia: Establece los requisitos para la instalación de sistemas de generación de energía en el municipio.

**Artículo 43:** Señala que los sistemas de generación de energía deben instalarse en un lugar seguro y accesible, y que no deben superar una altura máxima de 3 metros.

## **2.5. Definición De Términos**

**Ánodo:** Electrodo donde se produce la oxidación del combustible (hidrógeno) en una pila de combustible.

**Bombona de Hidrógeno:** Recipiente diseñado para almacenar y transportar hidrógeno de manera segura. Se fabrica con materiales resistentes a la presión (acero o aluminio) y cuenta con válvulas y sistemas de control para regular la liberación del hidrógeno.

**Cátodo:** Electrodo donde se produce la reducción del oxidante (oxígeno) en una pila de combustible.

**Catalizador:** Sustancia que aumenta la velocidad de una reacción química sin ser consumida en el proceso. En las pilas de combustible, se utilizan catalizadores de platino para acelerar las reacciones de oxidación y reducción.

**Celda:** Unidad básica de una pila de combustible donde se produce la reacción electroquímica que genera electricidad.

**Combustible:** Es una sustancia que se puede utilizar para generar energía a través de un proceso químico, generalmente la combustión. Durante la combustión, el combustible reacciona con un oxidante, normalmente oxígeno, liberando calor y otros productos de reacción.

**Densidad de energía:** Cantidad de energía almacenada por unidad de masa o volumen. El hidrógeno tiene una alta densidad de energía, lo que lo convierte en un combustible atractivo para las pilas de combustible.

**Eficiencia:** Relación entre la energía útil obtenida de un sistema y la energía total consumida por el mismo. Las pilas de combustible tienen una alta eficiencia en comparación con los motores de combustión interna.

**Electrolizador:** Dispositivo que utiliza electricidad para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno.

**Electrolito:** Es una sustancia que contiene iones libres, que son átomos o moléculas que han perdido o ganado electrones. Esto les permite conducir electricidad cuando se disuelven en agua u otro líquido. Dicha sustancia permite el flujo de iones entre los electrodos de una pila de combustible. En las PEMFC, el electrolito es una membrana polimérica.

**Emisión:** Sustancia liberada a la atmósfera por un proceso industrial o natural. Las pilas de combustible no producen emisiones contaminantes, solo agua como subproducto.

**Energía renovable:** Energías derivadas de fuentes naturales que se renuevan continuamente (luz solar, viento). Abundan en cualquier entorno.

**Fermentación de biomasa:** Método de producción de hidrógeno verde que utiliza microorganismos para descomponer la materia orgánica (residuos agrícolas o industriales) y producir hidrógeno como subproducto. Se lleva a cabo en condiciones anaeróbicas y puede ser una forma sostenible de obtener hidrógeno a partir de fuentes renovables.

**Fotólisis del agua:** Método de producción de hidrógeno verde que utiliza la luz solar para descomponer las moléculas de agua y obtener hidrógeno y oxígeno. Se basa en materiales semiconductores que absorben la luz solar y catalizan la reacción química.

**Hidrógeno:** Elemento químico más ligero y abundante del universo. Es un gas incoloro, inodoro e insípido. Se considera una fuente de energía limpia y renovable.

**Hidrólisis del agua:** Método de producción de hidrógeno verde que utiliza la electricidad para separar las moléculas de agua ( $H_2O$ ) en sus componentes de hidrógeno y oxígeno. Requiere electrolizadores que utilizan energía renovable (solar o eólica) para llevar a cabo la reacción química.

**Ley Orgánica de Hidrocarburos Gaseosos (Venezuela):** Regula la industria del gas, incluyendo el hidrógeno. Establece requisitos de seguridad, técnicos y de protección ambiental en toda la cadena de valor del hidrógeno.

**Membrana de intercambio protónico (PEM):** Membrana que permite el paso de protones ( $H^+$ ) pero no de electrones, crucial para el funcionamiento de las PEMFC.

**Oxidante:** Sustancia que gana electrones en una reacción química. En las pilas de combustible, el oxidante es oxígeno.

**Potencia:** Tasa de trabajo que realiza un sistema. Las pilas de combustible se pueden fabricar para generar diferentes niveles de potencia.

**Producción:** Es el proceso de convertir materias primas en bienes y servicios. Este proceso implica la transformación de recursos naturales, como la tierra, el agua y los minerales, en productos que pueden ser utilizados por los consumidores. Obtención de hidrógeno a partir de diferentes fuentes, como la electrólisis del agua, la reforma de hidrocarburos o la fermentación de biomasa.

**Reforma de hidrocarburos:** Proceso para convertir hidrocarburos (como el gas natural) en hidrógeno.

**Rendimiento:** Es un término con diversas aplicaciones, pero en general se refiere a la relación entre la utilidad o beneficio obtenido de algo y el esfuerzo, tiempo o recursos invertidos para conseguirlo. Se puede expresar como un porcentaje, una tasa o una cantidad absoluta. Capacidad de una pila de combustible para convertir el hidrógeno en electricidad.

**Transporte:** Transporte es el movimiento de personas, bienes y animales de un lugar a otro. Se puede realizar por diversos medios. Movimiento del hidrógeno desde el lugar de producción hasta los puntos de consumo. Puede ser por tuberías, camiones cisterna o buques criogénicos.

**Vida útil:** Vida útil es un término que se refiere al período de tiempo durante el cual un activo puede ser utilizado para generar beneficios económicos. Como por ejemplo la duración de una pila de combustible antes de que sea necesario reemplazarla.

**Voltaje:** Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. Las pilas de combustible generan un voltaje de alrededor de 0.7 voltios por celda.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

Con el propósito de lograr dar una visión más técnica y metodológica a la investigación, se buscará desarrollar y definir lo que es un marco metodológico, que según Tamayo y Tamayo (2003 p.37) lo define como “El proceso, que, mediante el método científico, procura obtener información relevante para entender, verificar, corregir o aplicar el conocimiento”.

Es imperativo señalar que la investigación, dada a su propia naturaleza, exige el tratamiento de algunos elementos. En este caso, se utilizarán métodos sustentados por diversos autores para resolver el problema planteado y que resulten convenientes a las metas que se persiguen; ya que la conformación de estos tiene que estar en perfecta concordancia con los objetivos de la investigación.

#### **3.1 Paradigma de la Investigación**

Capra (1996) explicó en aquel tiempo que “un paradigma de investigación es una concepción del objeto de estudio de una ciencia, de los problemas para estudiar, de la naturaleza de sus métodos y de la forma de explicar, interpretar o comprender los resultados de la investigación realizada” (p, 19).

Para la presente investigación se emplea un enfoque que determina el paradigma sobre el cual se va a investigar, en este caso será el cuantitativo que los autores lo definen como un conjunto de procesos organizados de manera secuencial para comprobar ciertas suposiciones. Cada fase precede a las siguientes y no se puede eludir pasos, el orden es riguroso, aunque desde luego, se pueda redefinir alguna etapa.

#### **3.2. Tipo de Investigación**

Un proyecto factible o investigación proyectiva, de acuerdo con Balestrini (2002), “los proyectos factibles son aquellos proyectos o investigaciones que proponen la formulación de modelos, sistemas entre otros, que dan soluciones a una realidad o problemática real planteada, la cual fue sometida con anterioridad o estudios de las necesidades a satisfacer” (p. 9).

Esta investigación se definirá de tipo proyecto factible o proyectivo, según el enfoque del autor, pues consiste en elaborar una propuesta de diseño de pila de combustible para solucionar de forma alternativa el problema de las fallas eléctricas para cualquier persona que decida adquirir esta innovadora fuente de energía.

### **3.3. Diseño de la Investigación**

Según Arias (2006), “la estrategia general, que adopta el investigador para responder al problema planteado, definido por el origen de los datos, tanto primarios, en diseños de campo como secundarios en estudios documental y la manipulación o no de las condiciones en las cuales se realiza el estudio.” (p. 26).

Por las consideraciones anteriores, se puede decir entonces que la presente investigación contará con un diseño apoyado en la investigación de campo, ya que los datos recolectados provendrán directamente del objeto de estudio. De igual manera, la investigación se encontrará apoyada a su vez de un diseño documental, ya que para la misma se recolectarán datos obtenidos por otros investigadores con el fin de adquirir nuevos conocimientos. Es por esto que la investigación presentará un diseño apoyado en una investigación de campo y documental, ya que se recolectarán datos directo del sujeto de estudio y de fuentes documentales secundarias

### **3.4. Nivel de la Investigación**

Según Valderrama (2017), se refiere al nivel de investigación “Según su naturaleza o profundidad, el nivel de una investigación se refiere al grado de conocimiento que posee el investigador en relación con el problema, hecho o fenómeno a estudiar. De igual modo cada nivel de investigación emplea estrategias adecuadas para llevar a cabo el desarrollo de la investigación” (p, 42).” A su vez, establece los siguientes tipos de nivel, investigación formulativa o exploratoria, investigación descriptiva, investigación correlacionar e investigación explicativa. Así mismo Hurtado (2002), “infiere que la investigación descriptiva tiene como objetivo la descripción precisa del evento de estudio, este tipo de investigación se asocia al diagnóstico; el propósito es exponer el evento estudiado, haciendo una enumeración detallada de sus características, de modo tal que en los resultados se pueda obtener dos niveles de análisis; dependiendo del fenómeno o del propósito del investigador, estas investigaciones trabajan con uno o con varios eventos de estudio en un contexto determinado, pero su intención no es establecer relaciones de causalidad entre ellos, por tal razón no ameritan de la formulación de hipótesis”.

Es por lo anterior que la investigación en curso será de tipo descriptiva siendo así una descripción de los parámetros necesarios para la elaboración de una propuesta de diseño, orientada a eludir las consecuencias de la falta de electricidad en los hogares venezolanos.

Durante su realización se describirán y analizarán las variables que intervienen en la problemática para generar una metodología de adaptación que dé respuesta a la situación a través de la formulación técnica de un sistema de generación eléctrica a través de la utilización de hidrógeno como combustible.

### **3.5. Población y Muestra**

#### **Población**

Tamayo y Tamayo (2001), “una población está definida por sus características definatorias, por tanto, el conjunto de elementos que posea esta característica se denomina población o universo” (p. 30). La población que se contempla en esta investigación son los diferentes sistemas de generación de energía eléctrica como baterías, y pilas que funcionan con distintos tipos de combustible al hidrógeno.

#### **Muestra**

Arias (2012) establece que la muestra es “un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible” y define a la muestra representativa como “aquella que por su tamaño y características similares a las del conjunto, permite hacer inferencias o generalizar los resultados al resto de la población con un margen de error conocido” (p. 83).

A partir de la población descrita se seleccionará para esta investigación una muestra conformada por las celdas de hidrógeno generadoras de energía eléctrica aplicables para hogares o zonas residenciales.

### **3.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

Según Hurtado (2006), “la selección de técnicas e instrumentos de recolección de datos implica determinar por cuáles medios o procedimientos el investigador obtendrá la información necesaria para alcanzar los objetivos de la investigación” (p.164). En este sentido, Arias (2012), indica que “Son ejemplos de técnicas; la observación directa, la encuesta en sus dos modalidades: oral o escrita (cuestionario), el análisis documental, análisis de contenido, entre otros” (p. 111).

Para obtener la información necesaria para abordar la información requerida se optará por realizar las siguientes técnicas de recolección de datos:

#### **3.6.1. Observación Directa**

Arias (2012) define que la observación “es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, el fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación preestablecidos” (p. 69). En la

presente investigación la ejecución de esta técnica de recolección de datos se llevará a cabo a través de la observación de los datos estadísticos pronunciados por empresas nacionales encargadas del suministro y reparaciones de energía en Venezuela, portales web y noticieros respaldados, para así obtener datos concisos y factibles para ser tomados en consideración para el desarrollo del diseño.

### **3.6.2. Revisión Bibliográfica**

Hurtado (2000) define la revisión bibliográfica como “la selección de los documentos disponibles sobre el tema, que contienen información, ideas, datos y evidencias por escrito sobre un punto de vista en particular para cumplir ciertos objetivos o expresar determinadas opiniones sobre la naturaleza del tema y la forma en que se va a investigar, así como la evaluación eficaz de estos documentos en relación con la investigación que se propone” (p. 90).

Por otro lado, Arias (2012) también define la revisión bibliográfica como “la selección de los documentos disponibles sobre el tema, que contienen información, ideas, datos y evidencias por escrito sobre un punto de vista en particular para cumplir ciertos objetivos” (p. 85).

El uso de la técnica de revisión bibliográfica en esta investigación se realizará a través del estudio de manuales técnicos, catálogos, documentos, trabajos de grado, revistas, libros, grabaciones, filmaciones, periódicos, artículos resultados de investigaciones, memorias de eventos, entre otros; para la obtención de información necesaria para adaptar el sistema de generación de energía, especialmente aquella referida a cálculos matemático, metodología de diseño, materiales idóneos y ergonomía para posteriormente seleccionar los componentes del sistema prediseñados y prefabricados para su posterior incorporación en el plano adaptado.

### **3.7. Técnicas de Análisis de Datos**

El análisis e interpretación de los resultados según Hurtado (2010) “son las técnicas de análisis que se ocupan de relacionar, interpretar y buscar significado a la información expresada en códigos verbales e icónicos” (p. 181).

Jonh Tukey (1997) describe en su libro "Exploratory Data Analysis" que las técnicas de análisis de datos “describe el EDA como un enfoque para el análisis de datos que se centra en la exploración visual y descriptiva de datos para identificar patrones, tendencias y anomalías.” (Capítulo 1, p. 1-2). Análisis FODA, análisis Multicriterio Ponderado (AMCP) y tomas de decisiones multicriterio (TDM) acompañarán el desarrollo del proyecto.

### **3.8. Fases Metodológicas**

Las fases de una investigación se refieren a las etapas o pasos que se siguen para llevar a cabo un estudio o investigación de manera sistemática y organizada. Estas fases pueden variar dependiendo del tipo de investigación. El desarrollo de esta investigación consta de tres (4) fases de estudio para el cumplimiento de los objetivos específicos antes planteados. Las fases a desarrollar son:

#### **Fase I: Diagnóstico de las Formas De Obtención Del Hidrógeno.**

Se buscó analizar y evaluar las formas de obtención de hidrógeno en Venezuela, tomando en consideración el acceso directo al combustible, así como también las alternativas existentes para obtener este combustible, a manera de conocer las deficiencias y posibles soluciones para tener acceso a este combustible.

#### **Fase II: Selección del método con la mejor adaptación al lugar de aplicación.**

Concluida la Fase I, se realizó un estudio para determinar qué método cuenta con la mejor relación de accesibilidad, seguridad, ergonomía y eficiencia para ser aplicado en zonas residenciales de manera tal que se permita su instalación, con todas las especificaciones y ventajas de su utilización.

#### **Fase III: Adaptación del sistema de abastecimiento de energía eléctrica.**

Ya concluida la Fase II, se adaptó el sistema, tomando en consideración el combustible almacenado, la celda elegida en la Fase II y el adaptador de la corriente (Inversor), utilizando los aspectos de accesibilidad, seguridad, ergonomía y eficiencia para su aplicación en hogares, esto a través de un análisis exhaustivo que englobe los factores asociados de la pila de hidrógeno, en el

marco de aplicación y otros asociados a Venezuela con el fin de garantizar una alternativa de generación de energía limpia, renovable y segura.

**Fase IV: Determinación de la viabilidad técnica, económica y ambiental de utilizar celdas de hidrógeno para abastecer de energía eléctrica sectores residenciales**

Por último, en esta Fase IV se dio a conocer el rendimiento técnico en comparación con otras formas de generación de energía, y conclusiones acerca de su viabilidad económica y ambiental para el medio ambiente.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

En el presente capítulo se abordarán las cuatro fases claves de la investigación, las cuales han sido planteadas con el fin de cumplir tanto con los objetivos específicos como el objetivo general de este estudio. El objetivo de este capítulo fue ofrecer un análisis riguroso y profundo de cada una de las fases, permitiendo así comprender los resultados y las conclusiones obtenidas, así como valorar la relevancia y la validez de los datos obtenidos en cada una de las fases. Dentro de las fases se incluye: diagnóstico de las formas de obtención del hidrógeno, selección del método con la mejor adaptación al lugar de aplicación, diseño del sistema de abastecimiento de energía eléctrica, demostración de la capacidad técnica y práctica de utilizar pilas de hidrógeno para abastecer de energía eléctrica sectores residenciales.

#### **4.1. Diagnóstico de las formas de obtención del hidrógeno.**

La primera fase se enfocó en las diferentes formas de acceder al combustible que hace factible la generación de energía, esto a través de la observación directa y la revisión documental, que permiten saber la actualidad de la producción de hidrógeno en Venezuela. El objetivo de esta fase es tomar en consideración las alternativas existentes para acceder al combustible, tomando en cuenta la novedad respecto al uso de un producto que no se fabrica en el país a gran escala o específicamente para su uso como combustible, más allá del potencial de la región para la fabricación del mismo.

##### **4.1.1. Análisis de la situación actual de la producción de hidrógeno en Venezuela.**

En Venezuela, si bien la producción industrial de hidrógeno aún no despegua, diversos proyectos e investigaciones se abocan a explorar su potencial como alternativa energética. En el marco del Proyecto de Ley de Energías Renovables y Alternativas, la Comisión Permanente de Energía y Petróleo se encontró la evaluación de las posibilidades de este elemento como fuente de energía no contaminante. El análisis del departamento afirma que "La generación de energía a través del hidrógeno como una iniciativa orientada a minimizar la contaminación ambiental", a cargo de los especialistas del mismo, ha servido como punto de partida para un debate crucial y la búsqueda de soluciones. La Comisión ha profundizado en los distintos procesos de generación de hidrógeno y ha delegado a la Subcomisión de Petroquímica, liderada por el diputado Carlos

Gamarra, la organización de una consulta que convoque a los sectores públicos y privados involucrados en este tipo de energía.

El diputado Ángel Rodríguez (2022) ha hecho énfasis en el trabajo pionero que ya adelantan países como China, Japón, Francia e Italia en el desarrollo del hidrógeno, e instó a Venezuela a aprovechar su capacidad científica y tecnológica para construir una plataforma industrial propia para su producción. Para avanzar en este objetivo, la Subcomisión de Petroquímica se encargó de organizar un debate y realizar consultas con expertos nacionales e internacionales, con el fin de diseñar una propuesta concreta para el Proyecto de Ley de Energías Renovables y Alternativas. La meta ha sido crear las condiciones para el desarrollo de la tecnología necesaria para la generación de este elemento. Adicionalmente Ángel Rodríguez (2022) pronunció “En el país se cuenta con el hidrógeno necesario para el desarrollo de la tecnología y se trabaja para minimizar los efectos de los combustibles fósiles”. En definitiva, Venezuela se encuentra en un momento crucial para explorar el potencial del hidrógeno como fuente energética alternativa. La conjunción de investigaciones, proyectos, consultas con expertos y la posible importación de este elemento abre un compás de posibilidades para avanzar hacia un futuro energético más sostenible y menos contaminante. En función de lo descrito por entes gubernamentales del país, se procede a realizar un análisis FODA para visualizar de mejor manera, la forma en que se puede acceder de manera más conveniente a este combustible, según los datos suministrados por Agencia Internacional de la Energía (AIE) en torno a Venezuela, la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), el centro de investigación y desarrollo de PDVSA (INTEVEP). (ver cuadro 1).

Con la información anterior se escogieron 4 alternativas, tomando en consideración todo lo expuesto anteriormente, y adicionalmente se decidió realizar una matriz Pugh, para seleccionar la alternativa que cuenta con las condiciones necesarias para ser aplicada en Venezuela.

Cuadro 1: Análisis FODA

<b>Oportunidades</b>		<b>Amenazas</b>	
<p>El mercado mundial de hidrógeno está en constante crecimiento, lo que representa una oportunidad para Venezuela de diversificar su economía.</p> <p>La producción de hidrógeno puede generar empleo y desarrollo en la región.</p> <p>Venezuela cuenta con infraestructura existente que puede ser reutilizada para la producción y exportación de hidrógeno.</p>		<p>La competencia de otros países productores de hidrógeno puede limitar la participación de Venezuela en el mercado internacional.</p> <p>La volatilidad de los precios del gas natural puede afectar la viabilidad económica de los proyectos de producción de hidrógeno en Venezuela.</p> <p>La falta de acceso a tecnologías limpias y sostenibles puede limitar la aceptación y demanda del hidrógeno producido en el país.</p>	
<b>Fortalezas</b>	<b>Fortaleza / oportunidad</b>	<b>Fortaleza / Amenaza</b>	
<p>Venezuela tiene reservas de gas natural que pueden ser utilizadas para la producción de hidrógeno.</p> <p>Existen potenciales socios internacionales interesados en invertir en proyectos de producción de hidrógeno en Venezuela.</p> <p>La ubicación geográfica de Venezuela le permite exportar hidrógeno a otros países de forma estratégica.</p>	<b>Estrategia 1</b>	<b>Estrategia 2</b>	
	<p>Utilizar la infraestructura existente, purificando el hidrógeno utilizado en el proceso de refinación</p>	<p>Aprovechar la ubicación geográfica del país, con el aporte de socios interesados en invertir en reformado de vapor de gas natural con captura y almacenamiento de carbono (CCS).</p>	
<b>Debilidades</b>	<b>Debilidades / Oportunidades</b>	<b>Debilidades / Amenazas</b>	
<p>La crisis económica y política en Venezuela puede dificultar la atracción de inversiones para proyectos de producción de hidrógeno.</p> <p>La falta de tecnología y experiencia en la producción de hidrógeno puede limitar el desarrollo de la industria en el país.</p> <p>La falta de políticas claras y estables puede dificultar la planificación a largo plazo de proyectos de producción de hidrógeno.</p>	<b>Estrategia 3</b>	<b>Estrategia 4</b>	
	<p>Traer electrolizadores para obtener hidrógeno, diversificando la economía, y creando la necesidad de políticas claras</p>	<p>Extraer hidrógeno rompiendo la molécula de gas metano, atrayendo futuras inversiones</p>	

Fuente: Eduardo Prato (2024), OPEP (2021), INTEVEP (2018), AIE (2024)

#### 4.1.1.1. Utilización de la matriz Pugh para selección de la alternativa del cuadro FODA

Se realizó una matriz de Pugh para la selección de la mejor alternativa para la producción de hidrógeno en Venezuela, realizando puntuación (Ver cuadro 2):

##### **Criterios:**

- **Costo:** Inversión inicial y costos operativos.

Inversión inicial: 85 (bajo), 42.5 (medio), 8.5 (alto)

Costos operativos: 10 (bajo), 5 (medio), 1 (alto)

Costos de mantenimiento: 5 (bajo), 2.5 (medio), 0.5 (alto)

- **Tiempo de implementación:** Tiempo necesario para iniciar la producción de hidrógeno. 1 año (rápido = 100), 3 años (medio = 50), 5 años (lento = 10).

- **Escalabilidad:** Capacidad para aumentar la producción de hidrógeno en el futuro. Alta (expansión rápida y con menos restricciones = 100).

- **Impacto ambiental:** Emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes

Emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación del agua, contaminación del aire: 0% (bajo = 100), 50% (medio = 50), 100% (alto = 10)

- **Dependencia de tecnología extranjera:** Necesidad de importar tecnología o experticia. Baja (tecnología desarrollada localmente = 100), Media (Incorporación de tecnología = 50) y alta (tecnología importada = 10)

- **Impacto social:** Creación de empleos, desarrollo de nuevas industrias. Creación de empleos: 100 empleos (bajo = 10), 500 empleos (medio = 50), 1000 empleos (alto = 100). Desarrollo de la comunidad: Bajo (sin impacto), Medio (impacto moderado), Alto (impacto significativo)

##### **Alternativas:**

**A1:** Utilizar la infraestructura existente, purificando el hidrógeno utilizado en el proceso de refinación.

**A2:** Aprovechar la ubicación geográfica del país, con el aporte de socios interesados en invertir en reformado de vapor de gas natural con captura y almacenamiento de carbono (CCS).

**A3:** Traer electrolizadores para obtener hidrógeno, diversificando la economía, y creando la necesidad de políticas claras.

**A4:** Extraer hidrógeno rompiendo la molécula de gas metano, atrayendo futuras inversiones.

Cuadro 2: Matriz de Pugh

Criterio	Ponderación	Puntaje			
		A1	A2	A3	A4
Costo de producción	30%	86.5	44	23.5	48
Tiempo de implementación	20%	90	10	100	30
Escalabilidad	20%	50	100	100	70
Impacto ambiental	15%	10	100	100	10
Dependencia de tecnología extranjera	10%	80	10	30	70
Impacto social	5%	80	100	100	87.5
<b>Total</b>	100%	396.5	364	453.5	315.5
<b>Total Ponderado</b>		67.45	56.2	70.05	47.275

Fuente: Eduardo Prato (2024), OPEP (2021), INTEVEP (2018), AIE (2024)



La mejor alternativa para la producción de hidrógeno en Venezuela, según la matriz de Pugh, puntuada a través de los datos suministrados por la OPEP y la INTEVEP, en su mayoría para para puntuar las alternativas 1 y 2 y los datos suministrados por la AIE, para puntuar las alternativas restantes según los criterios establecidos en un inicio permiten resaltar como a A3: **Traer electrolizadores para obtener hidrógeno**, diversificando la economía, y creando la necesidad de políticas clara, como la mejor entre ellas. Esta alternativa tiene la mayor calificación total, lo que indica que cumple con los criterios establecidos por encima del resto.

Sin embargo, la calificación de la alternativa A3, estuvo bastante cercana en puntuación ponderada, por lo cual se decidió realizar un segundo análisis para definir de forma exhaustiva las dos alternativas con mayor puntuación. Tanto la generación centralizada de hidrógeno a través de las refinerías existentes en Venezuela y, por otro lado, de forma independiente la generación a través de electrolizadores que suministren el hidrógeno a la pila de combustible directamente.

Cabe destacar que no se colocó como opción, la importación del combustible, debido a que el hidrógeno es un gas altamente inflamable y volátil, además tiene una densidad muy baja en comparación con otros combustibles, por lo que tiende a escaparse fácilmente a través de los materiales de contención por su baja densidad, lo que puede provocar pérdidas durante el transporte. Esto es especialmente preocupante en el caso de tuberías o tanques que contienen hidrógeno a alta presión, ya que cualquier fuga podría resultar en un incendio o una explosión. Incluso significa que se requiera de una gran cantidad de espacio para transportar una cantidad significativa de hidrógeno o en su defecto necesita tratamientos de compresión o criogenización del hidrógeno para su transporte, estos procesos son costosos y requieren una infraestructura especializada para llevarse a cabo.

La compresión del hidrógeno a altas presiones requiere equipos sofisticados y consume una cantidad considerable de energía, lo que aumenta los costos operativos, igual que la criogenización para transportarlo a bajas temperaturas, la cual también es costosa y requiere equipos criogénicos caros y complicados de mantener. Esto hace que el transporte de hidrógeno sea poco práctico, especialmente en comparación con combustibles más densos como la gasolina o el diésel. En resumen, la dificultad y los altos costos asociados con el transporte de hidrógeno a largas distancias hacen que esta opción sea poco viable en comparación con otros combustibles más convencionales. Por ello, es importante considerar estas limitaciones al diseñar sistemas que requieran de este combustible, en términos de almacenamiento y distribución de hidrógeno para garantizar su viabilidad y seguridad a largo plazo.

#### **4.1.2. Generación centralizada de hidrógeno a través de las refinerías existentes en Venezuela.**

El hidrógeno es un elemento esencial en la industria de refinación de petróleo, especialmente en Venezuela, donde juega un papel crucial en la producción de combustibles de alta calidad y en la competitividad del sector energético nacional. Es utilizado para hidrotratamiento, donde se eliminan impurezas como azufre, nitrógeno y metales pesados del petróleo crudo y sus derivados, cumpliendo con las normas ambientales y los estándares internacionales de calidad. Participa en el craqueo catalítico, un proceso que transforma moléculas grandes de hidrocarburos en moléculas más pequeñas y valiosas, como la gasolina y el diesel. Este proceso aumenta la producción de productos refinados de alto valor, optimizando el rendimiento del crudo y satisfaciendo la demanda del mercado interno e internacional. Y, por último, el

reformado, donde se transforma la nafta en componentes aromáticos, utilizados como materia prima para la industria petroquímica. Esta industria produce una amplia gama de productos, desde fertilizantes y plásticos hasta textiles y productos farmacéuticos, impulsando la diversificación económica del país.

Es importante destacar que el hidrógeno utilizado en estas refinerías se produce principalmente a partir de gas natural, lo que genera emisiones de CO<sub>2</sub>, es decir, se genera producción de hidrógeno gris. Aunque también se percibió que es un producto que está envuelto en varios procesos petroquímicos dentro de la industria en Venezuela. Las principales refinerías que utilizan hidrógeno para estos procesos en orden de uso según Informe de Gestión Anual de PDVSA (2016) en el apartado de refinación, y la OPEC (2021), en sus portales web son:

- **Refinería Amuay:**

Ubicación: Península de Paraguaná, estado Falcón.

Capacidad: 250.000 barriles por día.

Procesos: Reforming, craqueo, coquización.

Productos: Gasolina, gasóleo, GLP, coque.

- **Refinería Cardón:**

Ubicación: Península de Paraguaná, estado Falcón.

Capacidad: 220.000 barriles por día.

Procesos: Reforming, craqueo, desulfuración.

Productos: Gasolina, gasóleo, GLP, azufre.

- **Refinería El Palito:**

Ubicación: Estado Carabobo.

Capacidad: 90.000 barriles por día.

Procesos: Destilación, craqueo, alquilación.

Productos: Gasolina, gasóleo, GLP, asfaltos.

- **Refinería Puerto La Cruz:**

Ubicación: Estado Anzoátegui.

Capacidad: 110.000 barriles por día.

Procesos: Destilación, craqueo, coquización.

Productos: Gasolina, gasóleo, GLP, coque.

En conjunto, las refinerías venezolanas tienen una capacidad de procesamiento de alrededor de 670.000 barriles por día (BPD), cifra similar a la enunciada por el portal El economista, la cual mencionó que, Venezuela produce unos 735.000 b/d (datos de septiembre de 2023), lo que la convierte en el décimo productor del cartel pese a tener las mayores reservas de crudo del mundo

Considerando la producción actual mencionada en las refinerías venezolanas, se calculó la producción de hidrógeno gris de acuerdo a la proporción utilizada de hidrógeno en promedio para la refinación de hidrocarburos, según la Hydrocarbon Processing:

Según el rango de producción:

Mínimo:  $670.000 \text{ BPD} * 0.4 \text{ kg H}_2/\text{bbl} = 268.000 \text{ kg H}_2/\text{día}$

Máximo:  $670.000 \text{ BPD} * 0.6 \text{ kg H}_2/\text{bbl} = 402.000 \text{ kg H}_2/\text{día}$

Conversión a toneladas por día (TPD):

Mínimo:  $268.000 \text{ kg H}_2/\text{día} / 1.000 = 268 \text{ TPD}$

Máximo:  $402.000 \text{ kg H}_2/\text{día} / 1.000 = 402 \text{ TPD}$

La producción de hidrógeno gris en las refinerías venezolanas se estima entre 268 y 402 toneladas por día, calculado por como medida mínima producida, la producción estimada puede ser mayor según datos de PDVSA. La obtención del hidrógeno en estas refinerías es una alternativa de la adquisición del combustible para ser aprovechado como combustible, más allá de que su método de producción no es sustentable para el medio ambiente y las consideraciones operativas que promovería la distribución de este gas.

#### **4.1.3. Generación a través de electrolizadores**

Los electrolizadores son una alternativa viable para la producción de hidrógeno tanto a pequeña escala como a gran escala debido a su eficiencia y versatilidad en la generación de este gas, llevándolos a ser un componente clave en la economía del hidrógeno. Un electrolizador es un dispositivo que utiliza electricidad para separar los elementos de una sustancia compuesta, principalmente el agua, en sus componentes individuales. Este proceso se conoce como electrólisis. El electrolizador tiene dos electrodos: un ánodo (positivo) y un cátodo (negativo) donde se introduce una solución conductora, llamada electrolito, dentro del dispositivo. En el caso más común, el electrolito es agua con un álcali o un ácido disuelto para mejorar su conductividad, para generar la ruptura se aplica una corriente eléctrica a través de los electrodos. A medida que la demanda de hidrógeno aumenta, la producción de electrolizadores también está aumentando.

En primer lugar, los electrolizadores pueden ser instalados en espacios reducidos, lo que los hace ideales para su uso en pequeñas empresas o incluso en hogares. Esto permite a los usuarios producir su propio hidrógeno de manera autónoma, reduciendo así su dependencia de fuentes externas y disminuyendo los costos asociados con la compra de este gas.

Por otro lado, a gran escala, los electrolizadores son capaces de generar grandes cantidades de hidrógeno de forma continua y eficiente. Esto los convierte en una opción viable para su uso en industrias que requieren grandes cantidades de este gas, como la industria química o la automotriz. Además, al utilizar energía eléctrica renovable, como la solar o la eólica, los electrolizadores contribuyen a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y al fomento de un modelo energético más sostenible.

La utilización de los mismos evita problemas de traslado y almacenamiento, además de altísimos costos asociados, ya que están hechos para colocarse justo en el lugar de utilización del combustible. En añadido, el costo de los electrolizadores está disminuyendo y la eficiencia está mejorando, lo que hace que el hidrógeno sea una opción más competitiva para una variedad de aplicaciones.

Los aspectos considerados para elegir el electrolizador se relacionan con el consumo de hidrógeno que tiene la pila de combustible, por ello para elegir el electrolizador, primero se debe elegir la pila de combustible. Otros aspectos que se pueden mencionar son la capacidad de producción de hidrógeno, que se mide en metros cúbicos normales por hora ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ ), tipo de tecnología, presión de operación, eficiencia energética, fabricante, el tamaño y el peso, adaptado a una generación propicia para la pila de combustible utilizada.

#### **4.1.4. Evaluación de las alternativas preseleccionadas de obtención de hidrógeno**

Los aspectos que se tomaron en cuenta para realizar una segunda selección son:

- Pureza del Hidrógeno: La pureza del hidrógeno está relacionado con el rendimiento, a mayor pureza mayor rendimiento, este es crucial para el correcto funcionamiento de las pilas de combustible.
- Presión del Hidrógeno: La presión del hidrógeno debe ser compatible con tu sistema de pila de combustible, y los componentes asociados. Se toma en consideración dos aspectos fundamentales como, la presión de salida de los electrolizadores, presión de entrada a la pila de combustible, y posible utilización de un compresor de acuerdo a la presión de almacenamiento del combustible.

- **Logística y Almacenamiento:** Para el uso de bombonas, asegurar contar con un espacio adecuado para su almacenamiento seguro, tomando en cuenta los costos de transporte y almacenamiento del hidrógeno. Además, las regulaciones locales para el almacenamiento y manejo de hidrógeno.
- **Precio:** En cada uno de los aspectos a evaluar está asociado el precio, donde se debe buscar variedad de los mismos entre diferentes proveedores, considerando la pureza del hidrógeno, la presión, la modalidad de entrega y la logística para hacer la mejor elección, e incluso su precio de acuerdo a la eficiencia considerada
- **Garantías y responsabilidades:** Evaluar el estatus e historia reciente de las empresas que proveen servicios ligados a la producción del hidrógeno.
- **Reputación y Experiencia del Proveedor:** Busca referencias de otros clientes que hayan utilizado los servicios del proveedor.
- **Sostenibilidad:** Si es importante para ti, considera la huella ambiental del hidrógeno que vas a utilizar.

#### 4.1.5. Elección del método de obtención del hidrógeno

Según los criterios tomados en consideración, se realizó un cuadro para observar las ventajas y desventajas de cada método de obtención de acuerdo a los criterios mencionados (ver cuadro 3)

Cuadro 3: Electrolizador vs refinería

Criterio	Electrolizador	Hidrógeno de Refinería
Pureza del Hidrógeno	Muy alta (99.99%)	Alta (99.5-99.9%)
Presión del Hidrógeno	Ajustable según necesidad	Alta (hasta 300 bar)
Logística y Almacenamiento	Complejo (requiere infraestructura)	Relativamente simple (infraestructura existente)
Precio	Alto (inversión inicial)	Variable (depende del mercado)
Garantías y Responsabilidades	Garantía del fabricante (5-10 años)	Responsabilidad del proveedor
Reputación y Experiencia del Proveedor	Empresas especializadas en electrolizadores	Refinerías con experiencia en producción de hidrógeno
Sostenibilidad	Muy alta (energía renovable)	Variable (depende de la fuente de energía)

Fuente: Eduardo Prato (2024), IRENA (2022), INTEVEP (2018)

Una vez observado el cuadro 3, se resume en optar por el candidato adaptado a los requerimientos y viabilidad del caso, se comparó cada criterio para seleccionar la mejor opción en cada uno de ellos. Para cada punto se dejó en claro la ventaja de uno sobre otro y cuál sería el más adecuado para el proyecto, según las fuentes relevantes expuestas:

- Pureza del hidrógeno: El electrolizador es ideal para aplicaciones sensibles a la pureza, como en el caso de las pilas de combustible para obtener el máximo provecho, debido a que es mayor en referencia a las refinerías en general, remarcado en Venezuela que aún no se produce de manera específica para estos casos.
- Presión del hidrógeno: El electrolizador permite ajustar la presión según las necesidades específicas, lo que nos da versatilidad de usos según el consumo previsto. Mientras que, en el caso de la refinería, el proyecto se vería en la condición de contar con compresores o adecuar el sistema a la presión entregada por la refinería.
- Logística y almacenamiento: El electrolizador requiere infraestructura para la producción, almacenamiento y compresión del hidrógeno lo cual tiene como desventaja la necesidad de espacio, pero la ventaja de una logística más económica y segura. En el caso de la refinería se contaría con la ventaja de no depender del espacio, sin embargo, es una logística mucho más complicada en términos de transporte, sobre todo en Venezuela que se observó los problemas de distribución de servicios comunes como sucede con el gas metano.
- Garantía y responsabilidades: Los fabricantes de electrolizadores dan garantías de varios años (5-10 años). En el caso de las refinerías venezolanas optaríamos por generar acuerdos con la distribución del combustible.
- Reputación y experiencia del proveedor: La reputación de PDVSA en los últimos años nos deja claro que a pesar de las declaraciones no se ha percibido un avance significativo, además que se genera dependencia de proveedor externo al proyecto. A diferencia de adquirir un electrolizador fabricado por empresas de alto reconocimiento como Nel Hydrogen (Noruega), que cuenta con más de 3000 electrolizadores instalados en todo el mundo y ofrece una gama de electrolizadores para hogares, desde 250 Nm<sup>3</sup>/h hasta 1 Nm<sup>3</sup>/h
- Sostenibilidad: El electrolizador permite producir hidrógeno verde con energía renovable, la energía de funcionamiento del electrolizador puede provenir de paneles solares, por

ejemplo. En el caso que se desee producirlo de manera verde. Por otro lado, la refinería lo produce generando gases de efecto invernadero, se debería promover la instalación de tanques de almacenamiento de estos gases para generar hidrógeno azul, lo cual es posible, pero está enlazado a esperar años y políticas externas al proyecto.

- Precio: Se deduce que tienes mayor costo por inversión inicial el electrolizador debido a la adquisición de un equipo. En el caso de la actuación de las refinерías, el gasto sería directamente proporcional al consumo de la pila.

En resumen, se pudo evaluar de manera clara y objetiva que el método con mayor viabilidad en la mayoría de los criterios, tomando en cuenta la eficiencia del equipo y consideraciones externas políticas y actuales de Venezuela, que la generación de energía a través de un electrolizador es la correcta, por su alto rendimiento en términos de pureza, presión, transporte, así como también en relación a las garantías y reputación de las empresas proveedoras, validado a través de los datos suministrados por organizaciones de alto nivel de investigación expuestas en la fuente de cada cuadro; además el acceso al hidrógeno y la generación del mismo de forma independiente genera múltiples ventajas de adaptabilidad, generación y recuperación de la inversión, como se observó, tiene altos costos de adquisición de los equipos. Incluso, la generación de este tipo de energía es sostenible a través del electrolizador lo que nos permitió dar un veredicto elocuente, a medida de la pila de combustible que utiliza este combustible y no genera emisiones.

#### **4.2. Selección del método con la mejor adaptación al lugar de aplicación.**

En la presente fase se elige el tipo de pila de combustible, medio por el cual se genera la energía eléctrica, especificando el tipo de celda electrolítica con las características propicias para ser aplicada en zonas residenciales, así como también las restricciones del mismo. Dichos aspectos permitieron dar a conocer las ventajas del tipo de pila de combustible que se adapta de manera especial al lugar de aplicación del proyecto en consideración.

##### **4.2.1. Identificación de las características de los tipos de pila de combustible**

Se decidió optar por criterios que definan las capacidades técnicas y físicas de cada uno, para el espacio que ocupan se decidió definir una potencia estándar de 5kW para hacer referencia a las generalidades de tamaño. Adicionalmente se consideraron ventajas y desventajas de cada una (ver cuadro 4)

Cuadro 4: Identificación de características

Tipo de pila	Electrolito	Rango de temperatura (°C)	Eficiencia (%)	Lugar de aplicación	Vida útil (horas)	Ventajas	Desventajas	Espacio (m <sup>3</sup> para 5 kW)	Ruido (dB a 5 kW)
PEMFC	Membrana polimérica conductora de protones	60-80	40-60	Vehículos, aplicaciones portátiles, generación de energía estacionaria	5.000-10.000	Bajo costo, alta eficiencia, rápida respuesta a cambios de carga	Sensible a la calidad del combustible, requiere humidificación	0.5 a 1	30-40
PAFC	Ácido fosfórico	150-200	40-50	Generación de energía estacionaria, cogeneración	40.000-80.000	Alta durabilidad, bajo mantenimiento	Baja eficiencia, alto costo, tiempo de arranque lento	1 a 2	40-50
MCFC	Carbonato fundido	600-650	60-80	Generación de energía estacionaria, cogeneración	40.000-80.000	Alta eficiencia, bajo mantenimiento	Alto costo, materiales corrosivos, tiempo de arranque lento	2 a 3	40-50
SOFC	Óxido sólido	800-1000	50-60	Generación de energía estacionaria, cogeneración	40.000-80.000	Alta eficiencia, bajo mantenimiento, larga vida útil	Alto costo, materiales frágiles, tiempo de arranque lento	4 a 5	45-55
AFC	Hidróxido de potasio	60-100	50-60	Aplicaciones espaciales	1000-3.000	Alta eficiencia, rápida respuesta a cambios de carga	Sensible a la calidad del combustible, alto costo, baja vida útil	0.5 a 1	35-45

Fuente: TECPA (2023)

#### 4.2.2. Limitantes de las zonas residenciales

Las pilas de combustible de hidrógeno son una tecnología emergente con gran potencial para la generación de energía en ilimitadas aplicaciones según las especificaciones o tipos de pila utilizado, por ello se optó considerar las restricciones ante su implementación en espacios residenciales. Es sumamente importante tener en cuenta que estas tienen consideraciones de traslado, espacio, potencia y seguridad que deben estar dentro del marco aplicable tanto legal como admisible para su adquisición. Todo esto, en concordancia con las normas estipuladas según la ordenanza sobre el uso del suelo y la zonificación del Municipio Valencia, como instrumento legal que regula el uso del suelo y la zonificación del territorio municipal. Dado por sentado que el objetivo principal de este organismo es ordenar el crecimiento urbano de manera armoniosa y sostenible, compatibilizando las diferentes actividades que se desarrollan en el municipio.

Por otro lado, la temperatura en Venezuela, que posee un clima tropical con temperaturas cálidas durante la mayor parte del año, definió uno de los factores que afectan el rendimiento del sistema eléctrico considerado. La temperatura media anual varía entre 24°C y 28°C, con zonas que

superan los 30°C. Sin embargo, en las regiones montañosas, las temperaturas pueden descender hasta 10°C, esto según el INAMEH, el cual publica datos climáticos históricos y actualizados para Venezuela. Añadido a esto, se tuvo que la AIE, organización intergubernamental que promueve la cooperación en materia de energía en su informe "The Future of Hydrogen", indicó que la temperatura ambiente ideal para su funcionamiento es entre 20°C y 30°C, lo que se traduce en que la temperatura ambiental promedio de Venezuela se adapta de manera adecuada a las condiciones de operación de la pila de combustible. En casos que sea mayor se debe contar con un sistema de refrigeración para contar con el equilibrio adecuado.

Por consiguiente, es importante mencionar que las pilas de combustible vienen dadas en distintas capacidades según la potencia necesaria para suministrar en el campo de aplicación, lo cual determina factores de rentabilidad y uso, según la relación entre la capacidad energética y el consumo abastecido permitido, por ende, para realizar una adaptación de forma específica y aplicable directamente a un sector, se dió una propuesta por hogar en la región de Valencia, Venezuela, según el consumo energético de la zona, dándole la categoría de alto consumo según la ley de forma que la pila en cuestión tenga la capacidad de abastecer de forma segura y eficiente dicho consumo.

El comportamiento del consumo de energía por hogar se comporta de acuerdo a la cantidad de habitantes en el mismo, esto como valor estándar, comprendiendo diversos factores que dependen de características independientes del hogar. Dicho esto, se realizó un cuadro que muestra un consumo promedio de Venezuela en relación a la cantidad de habitantes por hogar a través de los datos suministrados por el Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica (MPPEE). (Ver cuadro 5)

Cuadro 5: Consumo según habitantes

Cantidad de Personas	Energía Consumida kWh/día	Rango de Consumo kWh/día
1	7	5 - 9
2	12	9 - 15
3	18	14 - 22
4	24	18 - 30
5	30	22 - 38

Fuente: Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica (2024)

El consumo real de energía puede variar significativamente dependiendo de una serie de factores, incluyendo el tamaño del hogar, los electrodomésticos y equipos electrónicos que se utilizan, los hábitos de consumo de energía de los residentes y el clima. Sin embargo, para sustentar la información se realizó un cuadro que muestre los equipos usualmente utilizados en un hogar de forma de validar la energía previamente estimada. (Ver cuadro 6)

Cuadro 6: Potencia según equipos

Equipo	Potencia (W)	Cantidad	Horas de uso por día	Energía diaria (Wh)	Energía mensual (kWh)
Nevera	150	1	24	3600	108
Lavadora	500	1	2	1000	30
Secadora	1500	1	1	1500	45
Aire acondicionado	1000	2	8	16000	480
Televisor	100	2	4	800	24
Bombilla LED	10	10	4	400	12
Computadora	250	1	4	1000	30
Cargador de teléfono	5	3	10	150	4.5
Licuadaora	750	1	0.5	375	11.25
Microondas	1000	1	0.5	500	15
Tostadora	900	1	0.25	225	6.75
Hervidor eléctrico	1500	1	0.25	375	11.25
<b>TOTAL</b>				<b>25925</b>	<b>777.75</b>

Fuente: Guía del consumidor de energía eléctrica en viviendas y oficinas. (2004)

El rango de consumo kWh/día se basó en una desviación estándar de +/- 20% del promedio. Ahora bien, en consecuencia, de los equipos tomados en cuenta se puede concluir que la energía promedio consumida es de 25.9 kWh. De igual manera para realizar los próximos cálculos, se tomó en consideración el consumo más alto de posible de 38 kWh para destacar como la pila de combustible puede abastecer dicha cantidad de energía.

Ya determinado el consumo por día se procedió a tomar en cuenta los picos de energía eléctrica promedio, durante las horas en que se conectan más equipos de forma de elegir un sistema que pueda soportar la carga máxima durante todo el día. (Ver cuadro 7)

Cuadro 7: Promedio de consumo de la población venezolana

Horario	Promedio de consumo (kWh)	Rango de consumo (kWh)
Mañana (7:00 - 9:00)	1.5 - 2.0	1.0 - 3.0
Mediodía (12:00 - 14:00)	2.5 - 3.5	2.0 - 4.0
Noche (18:00 - 20:00)	2.0 - 3.0	1.5 - 3.5

Fuente: Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica (2024)

La información proporcionada sobre el consumo y los picos de energía, dejó en evidencia la potencia necesaria para abastecer el 100% de los casos mencionados en este proyecto, y fueron los considerados para elegir la pila de combustible del proyecto en cuestión.

#### 4.2.3. Elección del tipo de pila de combustible de hidrógeno

Para elegir la mejor opción se realizó una ponderación de criterios para adaptarlos a las condiciones que presentan los espacios residenciales. Luego de generar la ponderación de criterios, se realizó la puntuación en función de los criterios ponderados. (Ver cuadro 8 y 9)

Cuadro 8: Criterios ponderados

Criterio	Importancia	Ponderación	Justificación
Eficiencia	Alta	30%	Maximiza la energía utilizable del combustible, reduce costos operativos.
Costo	Alta	20%	Impacta la inversión inicial y viabilidad económica.
Temperatura de Operación	Alta	20%	La temperatura de operación determina las aplicaciones viables para cada tipo de pila de combustible. Incluye el tema de seguridad según
Espacio	Media	10%	Optimiza el uso del espacio en hogares, especialmente en zonas densas.
Tiempo de Respuesta a Cambios de Carga y Tiempo de Arranque	Media	10%	Regula la energía ante fluctuaciones, importante en el contexto de Venezuela. Afecta la disponibilidad inmediata de energía, pero no es un factor crítico.
Ruido	Baja	5%	Minimiza la contaminación acústica para el confort del hogar. La mayoría emite tan poco ruido que baja significativa la importancia

Fuente: International energy agency (2005)

Cuadro 9: Puntuación según criterios ponderados

Criterio	Ponderación	SOFC (Óxido Sólido)		MCFC (Carbonato Fundido)		PEMFC (Membrana de Intercambio de		PAFC (Ácido Fosfórico)		AFC (Alcalina)	
		Puntaje	Puntaje ponderad	Puntaje	Puntaje ponderad	Puntaje	Puntaje ponderad	Puntaje	Puntaje ponderad	Puntaje	Puntaje ponderad
Eficiencia	30.00%	5.00	1.50	4.00	1.20	3.00	0.90	2.00	0.60	1.00	0.30
Costo	20.00%	3.00	0.60	2.00	0.40	5.00	1.00	4.00	0.80	1.00	0.20
Temperatura de Operación	20.00%	1.00	0.20	2.00	0.40	5.00	1.00	3.00	0.60	4.00	0.80
Espacio / Potencia	10.00%	4.00	0.40	3.00	0.30	5.00	0.50	2.00	0.20	1.00	0.10
Tiempo de Respuesta a Cambios de Carga y Tiempo de Arranque	10.00%	3.00	0.30	2.00	0.20	5.00	0.50	1.00	0.10	4.00	0.40
Ruido	5.00%	1.00	0.05	3.00	0.15	5.00	0.25	2.00	0.10	4.00	0.20
<b>TOTALES</b>			<b>3.05</b>		<b>2.65</b>		<b>4.15</b>		<b>2.40</b>		<b>2.00</b>



Fuente: International Energy agency (2005), TECPA (2023).

Según se observa en el cuadro 9, se define a la PEMFC como la pila de combustible de hidrógeno con las mejores condiciones de acuerdo a la información proporcionada por TECPA en relación a los datos suministrados sobre cada tipo de pila. Cabe destacar que este sistema de funcionamiento es el más utilizado en la actualidad, con un balance entre costo, eficiencia, tamaño y vida útil que a pequeña escala las hace ser la mejor opción. Estas tecnologías se distinguen por su notable densidad de potencia, permitiendo una respuesta rápida a las fluctuaciones en la demanda energética. Las PEMFC no producen emisiones contaminantes durante su funcionamiento, solo agua y calor. Esto las convierte en una opción ideal para hogares que buscan reducir su huella de carbono y mejorar la calidad del aire, son extremadamente silenciosas, cuentan con una tecnología fiable y de bajo mantenimiento, lo que significa que requieren menos atención y reparaciones que otras fuentes de energía, lo que las hace perfectas para su uso en zonas residenciales. Se pudo determinar que entre las opciones que, las PEMFC son una opción ideal para uso residencial debido a su alta eficiencia, limpieza, modularidad, silencio, fiabilidad,

flexibilidad, seguridad, capacidad de generación distribuida, incentivos y sostenibilidad lo que las hace perfectas para su uso en zonas residenciales. Las especificaciones de la pila de combustible se definieron en la siguiente fase.

### **4.3. Adaptación del sistema de abastecimiento de energía eléctrica.**

Para esta fase se procedió a buscar los equipos utilizados para la integración del sistema de abastecimiento eléctrico, considerando cubrir un consumo alto de energía en Venezuela, posibles variaciones y picos de energía, eficiencia del sistema, consumo de hidrógeno, presiones utilizadas, comportamiento de los equipos. Para suministrar corriente eléctrica a un hogar utilizando una pila de combustible de hidrógeno, se necesitan dispositivos adicionales que conforman el sistema a utilizar.

Cabe destacar que se realizaron una serie de cálculos para estimar la configuración de equipos en torno a la pila de combustible para la adaptación en zonas residenciales expuestas en cada ítem, herramienta esencial para la selección de equipos. Realizar estos cálculos con cuidado y precisión ayudó a tomar decisiones informadas y minimizar los riesgos asociados con el funcionamiento de los equipos e inversión necesaria, ya que se evidencia que a mayor capacidad mayor consumo.

#### **4.3.1. Pila de combustible**

En concordancia con las fases anteriores, se seleccionó la pila de combustible de hidrógeno PEMFC adaptada a las restricciones demandantes de los hogares de Valencia, Venezuela. Tomando en consideración un consumo diario de 38 kWh según el cuadro 5, cubriendo la energía máxima estimada por encima del promedio, un 50% de eficiencia energética de la pila de combustible, lo cual está un poco por debajo de la eficiencia de estas pilas en el mercado, y como último dato la eficiencia energética del inversor, se calculó la potencia que debe tener la pila de combustible de hidrógeno para un hogar, teniendo en cuenta que se tomaron valores que permiten obtener un margen de seguridad, abarcando el 100% de los casos descritos respecto a las restricciones, se tiene:

Paso 1: Convertir el consumo diario de energía a energía por hora:

Consumo diario: 38 kWh/día

**Consumo por hora: 38 kWh/día / 24 horas/día = 1.5833 kW**

Paso 2: Ajustar el consumo por hora por la eficiencia de la pila de combustible:

Eficiencia de la pila de combustible: 50%

**Consumo por hora ajustado:  $1.5833 \text{ kW} / 0.5 = 3.1667 \text{ kW}$**

Paso 3: Ajustar el consumo por hora por la eficiencia del inversor:

Eficiencia del inversor: 96%

**Consumo por hora final:  $3.1667 \text{ kW} / 0.96 = 3.30052 \text{ kW}$**

Paso 4. Redondear la potencia a un valor comercial estándar:

**Potencia comercial: 3.5 kW**


Paso 5. Resultado:

Una pila de combustible de hidrógeno con una potencia de 3.5 kW sería suficiente para abastecer de energía a un hogar que consume 38 kWh/día de energía, considerando las eficiencias de la pila de combustible y del inversor, así como también los picos de energía. Una vez identificada la potencia necesaria aplicable para producir una cantidad de energía alta se procede a elegir una pila de combustible en el mercado.

Se consideró buscar entre una serie de fabricantes reconocidos a nivel mundial, como PowerCell Sweden, Effoy, Plug Power Inc., Ballard Power Systems, Hydrogenics Corporation, Bloom Energy, Doosan, Guangdong Synergy Hydrogen Power Technology Co., Beijing SinoHytec Co. La mayoría de las pilas de combustible operan de forma automática, monitorean la carga de la batería y encendiéndose o apagándose según sea necesario, en comparación con los generadores a combustible, requieren menos mantenimiento ya que no poseen partes móviles propensas a desgaste, y dicho monitoreo, puede realizarse a través de una aplicación en tu smartphone o tablet, ofreciendo mayor comodidad.

Entre ellas se consiguió amplia gama de pilas para distintas aplicaciones, con rangos de potencia por debajo o demasiado por encima de los requerimientos solicitado los cuales fueron descartados, en consecuencia, los modelos que se adaptan a la solución son los siguientes cuadros. (Ver cuadro 10, 11 y 12)


Cuadro 10: Ficha técnica de la Powercell S1

<p>Fabricante: <b>PowerCell Sweden:</b>                  Modelo: PowerCell S1                  Potencia: 1 a 5 kW                  Aplicaciones: Residencial, comercial ligero                  Ventajas: Diseño compacto, modularidad, integración con energía solar</p>																																																	
<h3>Physical Data:</h3> <p>Specification for standard stack sizes</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2.0</th> <th>3.0</th> <th>4.0</th> <th>5.0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Max power (kW)</td> <td>1</td> <td>2.0</td> <td>3.0</td> <td>4.0</td> <td>5.0</td> </tr> <tr> <td>Cell Count</td> <td>10</td> <td>20</td> <td>30</td> <td>40</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Dimensions (mm)</td> <td>191x149x240</td> <td>191x187x240</td> <td>191x226x240</td> <td>191x265x240</td> <td>191x303x240</td> </tr> <tr> <td>Weight (kg)</td> <td>7.9</td> <td>11.3</td> <td>14.8</td> <td>18.2</td> <td>21.7</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>*PowerCells S1 stack power and size can be modified for specific needs</small></p> <p>All models</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Maximum current output</td> <td>200 A</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta P_{\text{cathode}}</math> @ nominal power</td> <td>Non-condensing at inlet</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta P_{\text{anode}}</math> @ nominal power</td> <td>&lt; 1.2 Bar (g)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">(H<sub>2</sub>, stoich 1.5, 15% inert)</td> </tr> <tr> <td>Maximum operating temperature</td> <td>85 °C</td> </tr> <tr> <td>Humidity</td> <td>Non-condensing at inlet</td> </tr> <tr> <td>Gas pressure</td> <td>&lt; 1.5 bar(abs)</td> </tr> <tr> <td>Coolant Pressure</td> <td>Gas pressure + 0.1 Bar</td> </tr> <tr> <td>Ambient temperature</td> <td>2 - 70 °C</td> </tr> </tbody> </table>			1	2.0	3.0	4.0	5.0	Max power (kW)	1	2.0	3.0	4.0	5.0	Cell Count	10	20	30	40	50	Dimensions (mm)	191x149x240	191x187x240	191x226x240	191x265x240	191x303x240	Weight (kg)	7.9	11.3	14.8	18.2	21.7	Maximum current output	200 A	$\Delta P_{\text{cathode}}$ @ nominal power	Non-condensing at inlet	$\Delta P_{\text{anode}}$ @ nominal power	< 1.2 Bar (g)	(H <sub>2</sub> , stoich 1.5, 15% inert)		Maximum operating temperature	85 °C	Humidity	Non-condensing at inlet	Gas pressure	< 1.5 bar(abs)	Coolant Pressure	Gas pressure + 0.1 Bar	Ambient temperature	2 - 70 °C
	1	2.0	3.0	4.0	5.0																																												
Max power (kW)	1	2.0	3.0	4.0	5.0																																												
Cell Count	10	20	30	40	50																																												
Dimensions (mm)	191x149x240	191x187x240	191x226x240	191x265x240	191x303x240																																												
Weight (kg)	7.9	11.3	14.8	18.2	21.7																																												
Maximum current output	200 A																																																
$\Delta P_{\text{cathode}}$ @ nominal power	Non-condensing at inlet																																																
$\Delta P_{\text{anode}}$ @ nominal power	< 1.2 Bar (g)																																																
(H <sub>2</sub> , stoich 1.5, 15% inert)																																																	
Maximum operating temperature	85 °C																																																
Humidity	Non-condensing at inlet																																																
Gas pressure	< 1.5 bar(abs)																																																
Coolant Pressure	Gas pressure + 0.1 Bar																																																
Ambient temperature	2 - 70 °C																																																

Fuente: Power cell S1 (2024)

Cuadro 11: Ficha técnica Ballard Power systems

**Fabricante: Ballard Power Systems:**  
**Modelo: FCvelocity-9SSL**  
**Potencia: 4.8 kW**  
**Aplicaciones: Vehículos comerciales, marina, respaldo de energía**  
**Ventajas: Durabilidad, robustez, alto rendimiento**



Ballard  
FCvelocity-9SSL

FCvelocity®- 9SSL

### Product Specifications

Rated Power [kW] <sup>1</sup>	3.8	4.8	10.6	14.4	17.3	21.2
DC voltage (at 300A) <sup>1</sup>	12.9	16.1	35.4	48.2	57.9	70.7
Mass (with no coolant) [kg]	6.2	6.8	10.2	12.1	14.3	16.6
Stack core length [mm]	92	104	174	220	255	302
Stack core width [mm]	760					
Stack core height [mm]	60					

Type	PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell stack	
Performance	Maximum current	300A
	Shock and vibration	Automotive <sup>2</sup>
Fuel Oxidant:	Fuel composition (pre-humidification)	SAE J2719
Oxidant	Oxidant composition (prehumidification)	Compressed ambient (filtered to remove particulates)
Stack Temperatures	Storage temperature <sup>3</sup>	-40 to 60° C (-40 to 140° F)
	Start-up temperature	> 2° C (> 36° F)
	Fluid inlet temperature (operating)	2 to 68° C (36 to 154° F) <sup>1</sup>

Fuente: Ballard (2024)

Cuadro 12: Ficha técnica de EFOY 2.5kW

<p><b>Fabricante: EFOY</b>      Modelo: EFOY 2.5</p> <p><b>Potencia: 2.5-10 kW</b></p> <p><b>Aplicaciones:</b> suministrar energía a infraestructuras de comunicaciones móviles, aplicaciones de tráfico inteligentes</p> <p><b>Ventajas:</b> La potencia de salida se puede escalar individualmente. Instalación sencilla y sin emisiones. Áreas ambientalmente sensibles, es muy silenciosa y eficiente. Además, contiene equipos para almacenar hidrógeno.</p>	
---	--

EFOY H <sub>2</sub> Cabinet variants	H <sub>2</sub> Cabinet X2.5 1FC-6H2-P300-39U	H <sub>2</sub> Cabinet X5.0 2FC-6H2-P300-39U	H <sub>2</sub> Cabinet X2.5 1FC-12H2-P300-39U	H <sub>2</sub> Cabinet X5.0 2FC-12H2-P300-39U
Coupling for Fuel Cell(s)	1	2	1	2
Coupling for H <sub>2</sub> bottles	6	6	12	12
Dimensions (H x W x D)	approx. 2000 x 1720 x 944 mm		approx. 2000 x 2580 x 944 mm	
Weight	450 kg (empty cabinet) Up to 1.100 kg (fully equipped)		650 kg (empty cabinet) Up to 1.600 kg (fully equipped)	
Housing	Aluminium, powder coated, RC2			
Temperature range	-33 °C to +45°C			
IP class	IP 54			

**EFOY Hydrogen Fuel Cell 2.5**

Power output <sup>2</sup>	2.500 W
Nominal voltage	48 V
Weight	28.5 kg
Nominal consumption	0.06 kg/kWh
Dimensions [L x W x H]	536 x 483 x 311 mm

**Hydrogen**

Content	6 x 50 l	12 x 50 l
Pressure	300 bar	
Connection thread	W 21.80 x 1/14 LH (DIN 477 no. 1)	
Weight	480 kg (6 x 80kg)	960 kg (12 x 80kg)
Nominal capacity	108 kWh	216 kWh
Autonomy @ 2.5 kW	43.2 h	86.4 h
Autonomy @ 5.0 kW	21.6 h	43.2 h

Fuente: EFOY (2024)

Las 3 opciones son válidas para la configuración establecida, sin embargo, se decidió optar por la EFOY 5kW, la cual tendrá una potencia por encima de lo establecido calculado (3.3kW), dicho margen está fundamentado en dos razones, en primer lugar, el mercado no vende potencias específicas, y en segundo lugar se tiene un margen de seguridad N para casos en que se requiera un mayor consumo, el cual será:

$$N = 5 / 3.3 = 1.3 \text{ (Dentro de los Estándares internacionales: IEC 60664-1, IEEE C37.90.)}$$

La completa información transmitida por el fabricante, la cual permite el correcto desarrollo del proyecto, y contar con cabinas que permiten asegurar los equipos necesarios, e incluso conocer la autonomía de la pila en función de la cantidad de hidrógeno utilizado aporta un valor agregado a la elección de pila de combustible adicionalmente incluye un sistema de aire de la pila de combustible que funciona de la siguiente manera:

- Filtro de aire: El filtro de aire protege la pila de combustible del polvo y la suciedad.
- Ventilador: Un ventilador silencioso impulsa el aire a través de la pila de combustible.
- Control de flujo de aire: Un sistema de control de flujo de aire asegura que la pila de combustible reciba la cantidad correcta de aire.

Por lo tanto, se hace innecesario el uso de un compresor en el sistema para la toma del aire, lo que conlleva a las siguientes ventajas:

- Mayor eficiencia: El uso de un compresor consume energía, por lo que no usar uno aumenta la eficiencia general del sistema.
- Menor ruido: Los compresores pueden ser ruidosos, por lo que no usar uno hace que la pila de combustible sea más silenciosa.
- Menor complejidad: No usar un compresor reduce la complejidad del sistema y lo hace más fácil de mantener.

En definitiva, con la potencia de 5kw se puede considerar una generación de potencia de un día acuerdo a los siguientes cálculos realizados:

**Datos:**

Potencia nominal de la pila de combustible: 5 kW

Eficiencia del inversor: 97% (ISO 16005)

Eficiencias estimadas de la pila de combustible:

40% (valor mínimo típico para pilas de combustible de hidrógeno PEMFC)

60% (valor máximo típico para pilas de combustible de hidrógeno PEMFC)

Duración del día: 24 h

Energía bruta producida por la pila de combustible en un día:

$$U = 5 \text{ kW} * 24 \text{ horas} = 120 \text{ kWh}$$

Energía neta producida según el promedio de eficiente

$$U = 120 \text{ kWh} * 40\% = 48 \text{ kWh}$$

$$U = 120 \text{ kWh} * 60\% = 72 \text{ kWh}$$

Energía neta producida después del inversor:

$$U = 48 \text{ kWh} * 97\% = 46,56 \text{ kWh}$$

$$U = 72 \text{ kWh} * 97\% = 69,84 \text{ kWh}$$

Resultado:

La pila de combustible EFOY 5kW puede producir aproximadamente 46.56 kWh de energía neta en un día con una eficiencia del 40%, lo cual está por encima de los 38 kWh /día considerados. Cabe destacar que los cálculos fueron realizados a plena carga y con valores estándar de este tipo de pila. Adicionalmente se determinó la eficiencia específica según los datos proporcionados por el fabricante, tomando en consideración la autonomía de la pila para funcionar 21.6h, 108 kWh de energía producida con 6 bombonas de 50 L a 300 bar de presión, se realizó el siguiente cálculo:

Primero se determinó la cantidad aproximada de hidrógeno contenido en las bombonas.

#### 1. Densidad de hidrógeno

La densidad del hidrógeno varía con la presión y la temperatura. A 300 bar y 20°C, utilizando la ley de los gases ideales:

$$\rho = (PM) / (RT)$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del hidrógeno (kg/m<sup>3</sup>)

P es la presión (300 bar)

M es la masa molar del hidrógeno (2.016 g/mol)

R es la constante universal de los gases ideales (8.314 J/mol·K)

T es la temperatura (20°C + 273.15 K = 293.15 K)

Sustituyendo los valores en la fórmula, se obtiene:

$$\rho = (300 \text{ bar} \times 2.016 \text{ g/mol}) / (8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K} \times 293.15 \text{ K})$$

$$\rho = 88.3 \text{ kg/m}^3$$

2. Volumen total de las bombonas:

El volumen total de 6 bombonas de 50L es de 300L (6 bombonas x 50L/bombona).

3. Fórmula para calcular la masa de hidrógeno:

Masa de hidrógeno = Densidad del hidrógeno x Volumen total

$$\text{Masa de hidrógeno} = 88.3 \text{ kg/m}^3 \times 300 \text{ L} \times (1 \text{ m}^3/1000\text{L})$$

$$\text{Masa de hidrógeno} = 26.49 \text{ kg}$$

Una vez conocida la cantidad de hidrógeno contenido en las bombonas, se definió la energía generada por kg de hidrógeno por la pila de combustible, esto a través de la potencia nominal de 108 kWh con la cantidad de hidrógeno consumida para producir la cantidad de energía. Y con ella, determinar la cantidad de hidrógeno necesario para abastecer la energía de consumo estimada por día de 38 kWh. Adicionalmente la cantidad de días en relación a la cantidad disponible de hidrógeno en las 6 bombonas.

$$\text{Energía por kg de hidrógeno} = 108 \text{ kWh} / 26.49 \text{ kg} = 4.077 \text{ kWh} / \text{kg}$$

$$\text{Masa de hidrógeno consumida por día} = 38 \text{ kWh/día} / (4.077 \text{ kWh/kg}) = 9.32 \text{ kg} / \text{día}$$

$$\text{Días de energía} = 26.49 \text{ kg} / 9.32 \text{ kg} / \text{día} = 2.84 \text{ días}$$

Esto resulta trabajando a plena carga y las horas necesarias para suministrar de energía el consumo máximo generado. Además, se recuerda que el consumo promedio de una casa estimado fue alrededor de 25 kWh. Adicionalmente se procedió a comparar 3 tipos de consumo por hora, consumo esperado según 38 kWh por día, el consumo de hidrógeno nominal y el consumo según la autonomía mostrada.

Caso 1: 38 kWh / día

Masa de hidrógeno consumida por hora = 9.32 kg / día / (1 día / 24h) = 0.388 kg/h; esto tomando en cuenta una distribución de consumo en un día

Caso 2: Potencia nominal 5 kW

$$\text{Masa de hidrógeno teórica consumida por hora} = 0.12 \text{ kg} / \text{kWh} * 5\text{kW} = 0.6 \text{ kg} / \text{h}$$

Caso 3: Según autonomía mostrada

$$\text{Masa de hidrógeno consumida} = 26.49 \text{ kg} / 21.6 \text{ h} = 1.2264 \text{ kg/h.}$$

En función de los resultados obtenidos se determinó la eficiencia del sistema, para ello se utilizó el valor calorífico del hidrógeno (HHV) para convertir la masa de hidrógeno consumida en energía. El HHV del hidrógeno es de 33.3 kWh/kg. Considerando la unidad de 2.5 kW se tiene:

$$\text{Consumo de energía} = (\text{Consumo nominal}) \times (\text{Potencia de salida}) \times (\text{HHV})$$

$$\text{Consumo de energía} = (0.06 \text{ kg/kW}) \times (2.5 \text{ kW}) \times (33.3 \text{ kWh/kg})$$

$$\text{Consumo de energía} = 4.995 \text{ kWh}$$

La eficiencia se define como la relación entre la energía útil producida y la energía consumida.

$$\text{Eficiencia} = (\text{Potencia de salida}) / (\text{Consumo de energía})$$

$$\text{Eficiencia} = (2.5 \text{ kW}) / (4.995 \text{ kWh})$$

$$\text{Eficiencia} = 0.501$$

$$\text{Eficiencia (\%)} = 0.501 \times 100 = 50.1\%$$

La eficiencia nominal de la pila es del 50%. Con toda esta información se seleccionaron los demás equipos en torno a cubrir las necesidades de la pila de combustible.

#### 4.3.2 Electrolizador

Tomando en consideración una producción residencial, utilizó un electrolizador de Nel Hydrogen, una empresa líder en el desarrollo y comercialización de tecnologías del hidrógeno, con sede en Herning, Dinamarca. Como respaldo se tienen algunos logros recientes de Nel, la firma de un contrato para suministrar 20 estaciones de hidrógeno a Alemania (2023), la inauguración de la estación de hidrógeno más grande de Europa en Noruega (2022) y la recepción de un pedido de 100 electrolizadores de hidrógeno de una empresa estadounidense (2021). El electrolizador seleccionado es un nel h series, en específico la serie H6. (Ver figura 6) (ver figura 8)

**nel**•  
H Series  
Proton Exchange Membrane (PEM)  
Hydrogen Generation Systems



Figura 6: nel H series

Fuente: nel (2024)

MODEL	H2	H4	H6
Description	On-site hydrogen generator in an integrated, automated, site-ready enclosure Load following operation automatically adjusts output to match demand Full differential pressure, H <sub>2</sub> over O <sub>2</sub>		
Electrolyte	Proton Exchange Membrane (PEM) – caustic-free		
<b>HYDROGEN PRODUCTION</b>			
Nominal Production Rate Nm <sup>3</sup> /h @ 0°C, 1 bar SCF/h @ 70°F, 1 atm kg/24 h	2 Nm <sup>3</sup> /h 76 SCF/h 4.31 kg/24 h	4 Nm <sup>3</sup> /h 152 SCF/h 8.63 kg/24 h	6 Nm <sup>3</sup> /h 228 SCF/h 12.94 kg/24 h
Delivery Pressure – Nominal	15 barg (218 psig); Optional 30 barg (435 psig)		
Power Consumption by System per Volume of H <sub>2</sub> Gas Produced <sup>1</sup>	7.3 kWh/Nm <sup>3</sup> (19.2 kWh/100 ft <sup>3</sup> )	7.0 kWh/Nm <sup>3</sup> (18.5 kWh/100 ft <sup>3</sup> )	6.8 kWh/Nm <sup>3</sup> (17.8 kWh/100 ft <sup>3</sup> )
Purity (Concentration of Impurities)	99.9995% [H <sub>2</sub> O < 5 ppm, -65°C (-85°F) Dew Point, N <sub>2</sub> < 2 ppm, O <sub>2</sub> < 1 ppm, all others undetectable]		
Turndown Range	0 to 100% net product delivery (automatic)		
Upgradeability	Field upgradeable to a maximum of 6 Nm <sup>3</sup> /h (228 SCF/h)		N/A
<b>DI WATER REQUIREMENTS</b>			
Consumption Rate at Maximum Production	1.83 l/h (0.50 gal/h)	3.66 l/h (0.96 gal/h)	5.50 l/h (1.42 gal/h)
Temperature	5 to 50°C (41 to 122°F)		
Pressure	1.5 to 4 barg (21.8 to 58 psig)		
Input Water Quality	Required: ASTM Type II Deionized Water, < 1 μS/cm (> 1 MΩ-cm) Preferred: ASTM Type I Deionized Water, < 0.1 μS/cm (> 10 MΩ-cm)		
<b>HEAT LOAD AND COOLANT REQUIREMENTS</b>			
Coolant <sup>2</sup>	Liquid-cooled; non-freezing, non-fouling; 5 to 35°C (41 to 95°F); 25°C cooling water maximum for ambient temperatures above 40°C		
Maximum Heat Load (Cooling Requirement)	8.1 kW (27,368 BTU/h) (2.3 tons refrigeration)	16.1 kW (54,936 BTU/h) (4.6 tons refrigeration)	23.7 kW (80,868 BTU/h) (6.8 tons refrigeration)
Coolant Flow Rate	Up to 45 l/min (12 gal/min)	Up to 68 l/min (18 gal/min)	Up to 87 l/min (23 gal/min)
Pressure Drop (at Full Flow)	Up to ~3.4 barg (~50 psig)	Up to ~3.4 barg (~50 psig)	Up to ~3.4 barg (~50 psig)
Maximum Pressure	6.9 barg (100 psig)		
<b>ELECTRICAL SPECIFICATIONS</b>			
Maximum Power Required within Expected System Life	22 kVA	38 kVA	55 kVA
Electrical Requirements	380 to 415 VAC, three phase, 50 Hz or 480 VAC, three phase, 60 Hz		

Figura 7: Ficha técnica nel hydrogen

Fuente: nel Hydrogen (2024)

Model	H2	H4	H6	
<b>INTERFACE CONNECTIONS – CONSULT INSTALLATION MANUAL FOR DETAILS</b>				
H <sub>2</sub> Product Port	1/4" compression tube fitting, SS			
H <sub>2</sub> Vent Port	1/2" FNPT, SS			
DI Water Port	1/4" FNPT, SS			
Calibration-Gas Port	1/4" FNPT, brass			
Coolant Supply and Return Ports	1" FNPT, brass			
Drain Port	1/4" FNPT, brass			
Electrical	Electrical terminals at fused disconnect inside electrical compartment			
Communications	Modbus TCP/IP, 24 VDC dry contacts			
<b>CONTROL SYSTEMS</b>				
Standard Features	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fully automated, push button start/stop</li> <li>Automatic fault detection and system depressurization</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>E-stop</li> <li>Remote start/stop</li> <li>Remote communications</li> <li>Optional: current command</li> </ul>	
Remote Shutdown	Hardwire input to safety PLC			
<b>PHYSICAL CHARACTERISTICS</b>				
Dimensions W x D x H	Product	180 cm x 81 cm x 191 cm (71" x 32" x 75")		
	Est. Shipping	206 cm x 104 cm x 216 cm (81" x 41" x 85") Note: Add 8 cm (3") to height for installed lifting brackets.		
Weight	Product	682 kg (1,500 lbs)	727 kg (1,600 lbs)	773 kg (1,700 lbs)
	Est. Shipping	807 kg (1,776 lbs)	858 kg (1,887 lbs)	908 kg (1,998 lbs)
IP Rating	IP66 for electrical compartment. IP43 for fluids compartment; Upgradeable to IP56.			
<b>ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS – DO NOT FREEZE</b>				
Standard Siting Location	Indoor, level ± 1°, 0 to 90% RH non-condensing, non-hazardous/non-classified environment			
Storage/Transport Temperature	5 to 60°C (41 to 140°F)			
Ambient Temperature Range	5 to 50°C (41 to 122°F)			
Altitude Range – Sea Level	2,000 m (6,562 ft)			
Room Ventilation	Proper ventilation must be provided from a non-hazardous area at a rate consistent with the cabinet ventilation rate listed below			
<b>SAFETY AND REGULATORY CONFORMITY</b>				
Maximum On-board H <sub>2</sub> Inventory at Full Production	0.040 Nm <sup>3</sup> @ 15 barg; 0.08 Nm <sup>3</sup> @ 30 barg 1.5 SCF @ 15 barg; 2.9 SCF @ 30 barg 0.0036 kg @ 15 barg; 0.0069 kg @ 30 barg			
Cabinet Ventilation with Environment	NFPA 69, chapter 8 and EN 1127-1, clause 6.2 Vent fan draws fresh air up to 28 Nm <sup>3</sup> /min (1,000 ft <sup>3</sup> /min)			
Noise dB(A) at 1 Meter	< 83			
Conformity	cTUVus (UL and CSA equivalent), CE (PED, Mach. Dir., EMC), ISO 22734-1			

Figura 8: Ficha técnica nel Hydrogen 2.0

Fuente: nel Hydrogen (2024)

Como se observa en la figura 7, el electrolizador considerado para la aplicación residencial tiene una producción de hidrógeno de aproximadamente 13 kg de hidrógeno al día y un consumo de agua de 5.5L/h. Con ello, se cubre el consumo determinado por la pila de combustible estipulada. Adicionalmente para dar un entendimiento energético basado en la utilización del hidrógeno se realizó un cálculo que estima la energía en kWh que puede ser producida a través de 1kg de este combustible, utilizando una pila de combustible promedio, tomando en cuenta la eficiencia de forma tal de estar cerca de los valores reales que se pueden esperar.

Como datos se utilizó una eficiencia del 50% en la pila de combustible, valor calorífico inferior (PCI) de 120 MJ/kg y un valor calorífico superior (PCS) de 142 MJ/kg. El PCI se utiliza generalmente para calcular la energía útil, mientras que el PCS incluye el calor latente de vaporización del agua. Por ello, para los cálculos realizados se utilizó el PCI. La cantidad de energía que se puede producir con 1 kg de hidrógeno es entonces:

$$\text{Energía kWh} = 1 \text{ kg} * 120 \text{ MJ/kg} * 0.5 \text{ (eficiencia)} = 60 \text{ MJ}$$

**Cómo 1 kWh = 3.6 MJ, se tiene que:**

**Energía kWh = 16.67 kWh** (usando PCI). Haciendo una ejemplificación para determinar el tiempo en que puede producir esta energía a plena carga con una pila de combustible de 5 kW, de eficiencia del 50% tenemos que:

$$\text{Horas de funcionamiento 1 kg de hidrógeno} = 16.67 \text{ kWh} / 5 \text{ kW} = 3.334 \text{ h}$$

### **4.3.3. Inversor**

La pila de combustible produce corriente continua (CC), mientras que la mayoría de los hogares utilizan corriente alterna (CA). Un inversor convierte la CC de la pila en CA compatible con la red eléctrica del hogar. En cuanto a las recomendaciones que se tomaron para la selección del inversor se tiene que debe tener una potencia nominal igual o superior a la potencia de la pila de combustible, en este caso 5kW, debido a que con una potencia similar a la pila de combustible proporcionará un mejor rendimiento y una mayor capacidad de respuesta, si el inversor tiene una potencia inferior a la pila de combustible, podría sobrecargarse y dañarse. Esto también podría provocar un incendio o un cortocircuito. Al seleccionarlo debe ser compatible con el voltaje de salida de la pila de combustible, que en este caso es de 48V. Para uso residencial, se recomienda un inversor monofásico de onda sinusoidal pura, la onda sinusoidal pura es similar a la electricidad de la red eléctrica, por lo que son ideales para alimentar cargas sensibles como computadoras y

equipos electrónicos. Además, los inversores trifásicos son más costosos y generalmente se utilizan en aplicaciones comerciales e industriales.

Al tener presente la información de la pila de combustible, se eligió el inversor compatible con las características de salida de la pila de combustible. En este caso del fabricante PowMR, los cuales se abastecen de energía de una fuente de alimentación de CC, como una batería o un panel solar, o en este caso la pila de combustible de hidrógeno la cual entrega CC. La fuente de alimentación de CC proporciona la energía que el inversor necesita para convertirla en energía de CA. Los inversores PowMr pueden funcionar con una variedad de fuentes de alimentación de CC, incluyendo:

- Baterías: Pueden funcionar con baterías de plomo-ácido, baterías de litio-ion y baterías de gel.
- Paneles solares: Pueden funcionar con paneles solares para convertir la energía solar en energía de CA.
- Aerogeneradores: Pueden funcionar con aerogeneradores para convertir la energía eólica en energía de CA.
- Red eléctrica: Pueden conectarse a la red eléctrica para funcionar como inversores de respaldo.

El inversor elegido cuenta con las siguientes especificaciones (ver figura 9) (ver figura 10):



Figura 9: Inversor solar 5000W (2024)

Fuente: Amazon

Característica	Especificación
<b>Entrada</b>	
Voltaje máximo de circuito abierto PV	500 VCC
Rango de voltaje de funcionamiento PV	120-500 VCC
Rango de voltaje MPPT	120-450 VCC
Potencia máxima de entrada PV	5500W
Máxima energía	10000VA
<b>Salida</b>	
Potencia de salida nominal	5000VA
Voltaje de salida nominal	110/120Vac (monofásico), 120V/240V (fase dividida), 208V (2/3 fase)
Rango de voltaje de salida (L-N)	100 ~ 120Vac, 120Vac predeterminado (monofásico)
Rango de voltaje de salida (L-L)	200 ~ 240 Vac, 240 Vac predeterminado (fase dividida)
Frecuencia	50 Hz/60 Hz
Fase	120 V (monofásico), 120 V/240 V (fase dividida), 208 V (2/3 fase)
Capacidad paralela	hasta 6 unidades en paralelo
<b>Batería</b>	
Voltaje de la batería	48V
Tipo de batería compatible	Plomo-ácido (sello, AGM, gel, inundadas), Litio
Controlador de carga solar MPPT	100A, eficiencia hasta 99.9%
<b>Comunicación</b>	
Protocolos	CAN, USB, RS485
<b>Protecciones</b>	
Protección de corriente de entrada fotovoltaica/limitación de potencia	Sí
Sobretensión de entrada fotovoltaica	Sí
Protección de corriente inversa nocturna fotovoltaica	Sí
Protección de sobretensión de entrada de CA	Sí
Protección contra bajo voltaje de entrada de CA	Sí
11 protecciones adicionales	Sí
<b>Paralelo</b>	
Capacidad de conexión en paralelo	Hasta 6 unidades
Potencia total máxima	30.000 kW
Conexiones paralelas compatibles	Monofásica, fase dividida, trifásica
Fase dividida	Requiere dos o más inversores
<b>Otros</b>	
Dimensiones	480 x 260 x 110 mm
Peso	15.5 kg
Certificaciones	CE, RoHS, FCC

Figura 10: Especificaciones Inversor Solar PowMr

Fuente: Amazon

#### **4.3.4. Tanque de almacenamiento de hidrógeno**

El hidrógeno se almacena en tanques especiales a alta presión, también conocidas en Venezuela como bombonas, el número de bombonas dependerá del consumo de energía del hogar, de la frecuencia con la que se reabastece, y de la presión considerada. Cabe destacar que la presión utilizada o el número de bombonas determinado fue seleccionado tomando en cuenta que puedan ser transportadas de lugar. Esto debido a que se puede considerar una configuración de un tanque-válvula con una presión igual que la presión de salida del electrolizador para el tanque y ajustada a través de la válvula para su entrada directa a la pila de combustible. La presión ideal para las pilas PEM es de 1.5 a 3 bar, en el caso del fabricante es 0,45 bar y a la salida del electrolizador la presión según el fabricante es de 1.53 bar, lo cual respalda esta teoría, hay que tomar en cuenta que no es el mejor escenario posible, preferiblemente usar válvulas para adaptar la presión.

Se consideró utilizar la configuración utilizada por el fabricante EFOY, que además muestra la autonomía, según la cantidad de bombonas necesarias en las especificaciones del cuadro 12. Como se observa en dicho cuadro, cuenta con una configuración de 6 bombonas, a 300 bar, presentando una autonomía de 21.6 a plena carga.

Este consumo de acuerdo a generación de 108 kWh de potencia generada, lo cual de acuerdo a los 38 kWh por día de consumo nos arrojó un resultado de casi 3 días de uso continuo, con esta configuración. Lo cual equivale a 9.32 kg / día de hidrógeno necesario para cubrir las necesidades energéticas de un hogar.

Para cumplir con altos estándares de calidad debido a la alta presión, se debe contar con materiales adecuados, debido a que el hidrógeno con su bajo peso molecular, tiene la capacidad de difundirse a través de algunos materiales, causando daños intersticiales, donde penetra en la estructura cristalina del material, debilitando y provocando fragilidad. O en otros casos permeabilidad, escapando de la bombona y reduciendo la cantidad de combustible disponible, así como también generando corrosión al reaccionar con el material de la bombona. De cualquier forma, puede traer como consecuencia degradación del material afectando las propiedades mecánicas del material, como su resistencia a la tracción y la fatiga. Esto puede aumentar el riesgo de fallo de la bombona.

Por ello, se debió seleccionar bombonas de hidrógeno del fabricante Anhui Clean Energy Co., Ltd. Según la norma UNE-EN ISO 9809-1:2020 titulada "Botellas de gas. Diseño, construcción y ensayos de botellas de gas y de tubos recargables en acero sin soldadura".

Dicha norma especifica los requisitos para el diseño, la construcción y los ensayos de botellas de gas recargables de acero templado y revenido sin soldadura, tubos recargables de acero templado y revenido sin soldadura. Aplica para botellas y tubos con una capacidad en agua comprendida entre 0,5 l y 150 l, y para gases comprimidos, licuados o disueltos. No contempla botellas y tubos soldados, botellas y tubos de materiales distintos al acero o botellas y tubos diseñados para presiones superiores a 30 MPa.

Además, cubre aspectos de diseño, lo cual es importante para aguantar altas presiones, el recipiente interior puede estar hecho de:

- Acero inoxidable: El material principal del recipiente, que proporciona resistencia a la presión y a la corrosión.
- Revestimiento de polímero: Se aplica al acero inoxidable para mejorar la resistencia a la permeabilidad del hidrógeno y reducir la corrosión.

Y para la capa exterior:

- Fibra de carbono: Proporciona una alta resistencia a la presión y un peso ligero.
- Resina epoxi: Se utiliza para unir las fibras de carbono y proporcionar rigidez a la estructura.

Además, cuentan con válvulas de seguridad que permiten el flujo controlado de hidrógeno y evita la sobrepresión en la pila de combustible, dispositivo de protección contra sobrellenado y sensores de presión para monitorear la presión del hidrógeno dentro de la bombona.

(Ver figura 11)



Figura 11: Bombonas de hidrógeno

Fuente: Anhui Clean Energy Co., Ltd. (2024)

#### **4.3.5. Dispositivos de seguridad**

Se necesitan diversos dispositivos de seguridad para garantizar un funcionamiento seguro, a pesar de que los equipos mencionados y elegidos cuentan con sistemas de seguridad certificados como se muestra en su ficha técnica, el control del hidrógeno presenta una serie de riesgos que promovieron a usar los siguientes equipos para reducir cualquier riesgo, o daños en caso de accidentes:

##### **4.3.5.1 Detectores de fuga de hidrógeno**

Se decidió realizar una investigación sobre los tipos de sensores de manera de contar con un dispositivo que permita alertar sobre una fuga, esto debido a la alta inflamabilidad y lo difícil de detectar una fuga de combustible debido a que es un gas incoloro y, además, inoloro. Adicionalmente según las normativas ISO 10156 se optó por usar este tipo de sensores y se preestablecieron los requisitos de rendimiento de gases combustibles en relación a la detección de fugas. Estos requisitos se evalúan según criterios

- **Sensibilidad:**
  - En general, la norma ISO 10156 exige que los sistemas de detección de fugas de hidrógeno sean capaces de detectar fugas de un tamaño de 0,1 mm<sup>3</sup>/s (2.78 ppm) o menor.
- **Tiempo de respuesta:**
  - El tiempo de respuesta del sistema debe ser lo suficientemente rápido para dar una alarma antes de que la fuga de hidrógeno represente un peligro. El tiempo de respuesta máximo permitido por la norma ISO 10156 es de 1 segundo.
- **Facilidad de uso:**
  - La norma ISO 10156 proporciona directrices para la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de detección de fugas de hidrógeno.

Es de vital importancia contar con un sistema que aporte tranquilidad a los usuarios sobre la dispersión de este combustible en sus hogares, sobre por la incidencia del mismo en los materiales. Para realizar la elección se decidió mostrar las características de cada uno según el tipo de funcionamiento para luego escoger según varios factores relevantes. Entre los tipos de sensores se encuentran:

### Opción 1: Sensores electroquímicos

Funcionan mediante la detección de la corriente eléctrica generada por la reacción química entre el hidrógeno y un electrodo. Son los más económicos y fáciles de usar, pero pueden ser sensibles a la interferencia de otros gases.

### Opción 2: Sensores de estado sólido

Detectan el cambio en la conductividad eléctrica de un material semiconductor cuando está expuesto al hidrógeno. Son más caros que los sensores electroquímicos, pero también más sensibles y específicos para el hidrógeno.

### Opción 3: Sensores ópticos:

Detectan la absorción de luz por el hidrógeno a una longitud de onda específica. Son los más caros de los tres tipos, pero también los más sensibles y específicos para el hidrógeno.

La elección del tipo de sensor de hidrógeno adecuado depende de varios factores como la aplicación (Detección de fugas, monitoreo ambiental, control de procesos), el rango de detección (Concentraciones de hidrógeno a medir), Precisión (Nivel de precisión necesario), Tiempo de respuesta (Velocidad de detección de cambios en la concentración de hidrógeno), Costo. En función de estos criterios se ejecutó el siguiente cuadro (ver cuadro 13)

Cuadro 13: Selección de sensores

Criterio	Opción 1: Sensor electroquímico	Opción 2: Sensor de estado sólido	Opción 3: Sensor óptico
Aplicación	Detección de fugas, monitoreo ambiental	Detección de fugas, monitoreo ambiental, control de procesos	Detección de fugas, monitoreo ambiental
Rango de detección	0-1000 ppm	0-100 ppm	0-10 ppm
Precisión	±5%	±2%	±1%
Tiempo de respuesta	1-2 segundos	0.5-1 segundo	0.1-0.5 segundo
Costo	Bajo	Medio	Alto

Fuente: photonics (2023), Catalysts (2022).

El criterio de mayor importancia aplicado a la zona es el costo, debido a que los datos de control de procesos y monitoreo ambiental deben ser revisados por especialistas. Adicionalmente cabe destacar que los tres cumplen con los requerimientos mínimos, por lo que el peso de la elección se realizó en función del costo y básicamente en la detección de fugas. En consecuencia, para detección de fugas en zonas residenciales se recomienda un sensor electroquímico debido a su bajo costo y adecuado tiempo de respuesta. Entre los sensores electroquímicos, se encuentran amperométricos, potenciométricos y conductimétricos, por ende, se optó por realizar un cuadro de ventajas y desventajas para la selección del más apropiado. (Ver cuadro 14).

Cuadro 14: Amperométricos vs Potenciométricos vs Conductimétricos

Tipo de sensor	Ventajas	Desventajas
Amperométrico	Bajo costo, Alta sensibilidad y precisión, Respuesta rápida	Sensible a otros gases, Requiere calibración regular, Vida útil limitada
Potenciométrico	Alta sensibilidad y precisión, No requiere calibración regular, Larga vida útil	Más costoso, Respuesta más lenta, Más sensible a la temperatura
Conductimétrico	Bajo costo, Fácil de usar, Respuesta rápida	Menor sensibilidad y precisión, Sensible a otros gases y humedad

Fuente: Mónica Cerro López, UDLAP (2017)

Adicionalmente se hizo un cuadro en función de criterios y valores exactos (ver cuadro 15):

Cuadro 15: Criterios de sensores electroquímicos

Tipo de sensor	Precisión	Tiempo de respuesta	Vida útil	Costo
Amperométrico	±2%	1-2 segundos	1-2 años	Bajo
Potenciométrico	±0.5%	5-10 segundos	5-10 años	Medio
Conductimétrico	±5%	0.5-1 segundo	2-3 años	Bajo

Fuente: Mónica Cerro López, UDLAP (2017)

Debido a la precisión alta y bajo costo se decidió utilizar un sensor amperométrico, entre ellos se escogió uno que cuenta con monitor de gas de alta calidad, este dispositivo de detección de fugas de gas, no solo abarca el hidrógeno sino también otros gases (H2 H2s Nh3 Ch4 C2h2),. y es el detector de gas con sensor Honeywell (ver figura 12), además el tiempo de respuesta es de 1 segundo. (Ver cuadro 16)



Figura 12: Detector de gas con sensor Honeywell.

Fuente: Shandong Dory Electronic Technology Co., Ltd. (2024)

Cuadro 16: Ficha técnica sensor Honeywell.

Especificación	Descripción
Soporte personalizado	OEM, ODM, OBM
Lugar de origen	Shandong, China
Garantía	12 meses
Marca	tpp
Modelo	TC200
Principio de detección	Combustión catalítica
Nombre del producto	Detector de gas fijo
Color	Naranja / Personalizable
Rango de medición	0-100% LEL
Sensor	Honeywell o personalizado
Tipo de alarma	Sonido + Alarma luminosa
Gas detectado	Combustible / Tóxico / Doble gas
Pantalla	LCD
Uso	Producción industrial
Método de muestreo	Difusión

Fuente: Shandong Dory Electronic Technology Co., Ltd. (2024)

#### 4.3.5.2 Sistema de ventilación y extracción.

El hidrógeno es un gas inflamable y puede ser peligroso si no se maneja adecuadamente, por ello la importancia de sistemas de ventilación y extracción, es esencial para la seguridad en el uso del gas hidrógeno. Este sistema ayuda a eliminar el gas hidrógeno del área de trabajo y a prevenir la acumulación de gases peligrosos. Las principales razones son prevenir la acumulación de gases peligrosos y eliminar el gas hidrógeno del área de trabajo. Además, que en caso de explosión el sistema de extracción permite evitar la mayor cantidad de daños, además proteger la salud de los trabajadores.

En función de las siguientes normativas NFPA 2 (Norma para la prevención de incendios y explosiones de hidrógeno), IEC 60079-10-1 (Atmósferas explosivas - Parte 10-1), y la clasificación de áreas para gases, vapores y nieblas inflamables, la recomendación es colocar el dispositivo en un lugar ventilado, y amerita su utilización solo en aplicaciones cerradas.

- Ventiladores: Extraen el hidrógeno del aire en caso de fuga.
- Sistemas de extracción: Eliminan el hidrógeno de áreas confinadas.

Donde estos equipos de aire acondicionado para atmósferas explosivas o en entornos donde existe la posibilidad de formación de mezclas inflamables de gases o vapores son de clase I-Zona 0, División 1. Y además hay presencia de sustancias inflamables: Hidrógeno, éter, etileno, acetona, amoníaco, benceno, gasolina (Grupos B, C y D). (Ver figura 12)

#### 4.3.6. Montaje del sistema

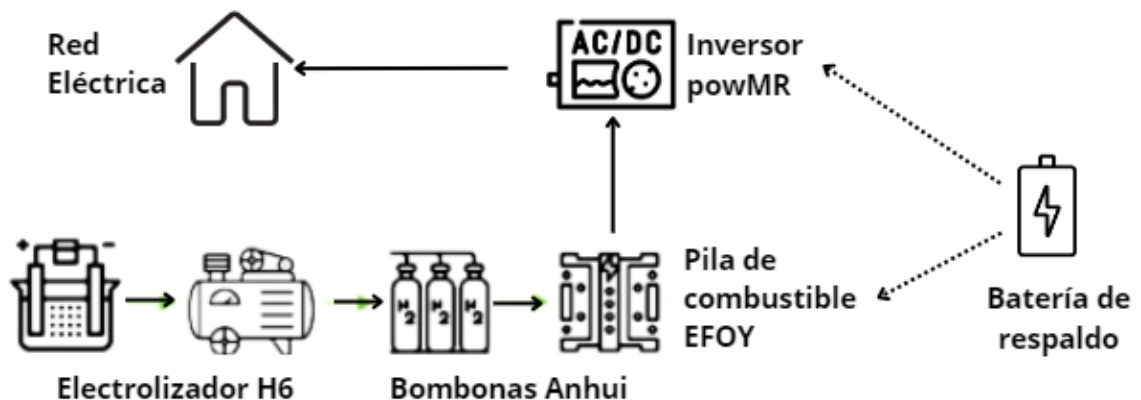


Figura 13: Montaje

Fuente: Eduardo Prato (2024)

En la figura 13, se observa el electrolizador H6 compuesto por el sistema de separador de la molécula de agua y adicionalmente un compresor, ya que, debe pasar por un sistema de compresión hasta llegar a 300bar. Luego, a la salida de la bombona, el hidrógeno pasa por una válvula reguladora, para llegar con la presión admitida por la pila de combustible. Por último, la corriente continua de salida de la pila llega a el inversor, donde pasa a corriente alterna, la cual está conectada a la red eléctrica de la casa para suministrar la energía a todo el hogar. En la figura se puede observar las bombonas, pilas de combustible y en este caso, coloca baterías para suministrar corriente a la pila de combustible. (Ver figura 14)



Figura 14: Conjunto armado

Fuente: EFOY (2024)

La corriente suministrada a la pila de combustible puede transmitirse a través de baterías cargadas por paneles solares o a través del suministro nacional que llega a cada hogar. (Ver figura 15).



Figura 15: Conjunto armada dos

Fuente: EFOY (2024)

#### **4.4. Determinación de la viabilidad técnica, económica y ambiental de utilizar celdas de hidrógeno para abastecer de energía eléctrica sectores residenciales**

En esta última fase se puso en comparación la pila de combustible de hidrógeno en el marco de la solución más utilizada actualmente, de forma de evaluar cómo sus características y su rendimiento, se encuentra en una posición ventajosa en frente de otros sistemas de generación de energía, o incluso potencia la energía generada a través del uso del hidrógeno. Además, se resaltó cómo radica su importancia como alternativa sustentable, por encima de lo económico a forma de visualizar la importancia en el marco global, según las condiciones climáticas a las cuales el mundo se encaminó hace muchos años debido a producción de gases contaminantes, que consigo ha traído múltiples consecuencias.

##### **4.4.1 Comparativa de la pila de hidrógeno vs batería de litio**

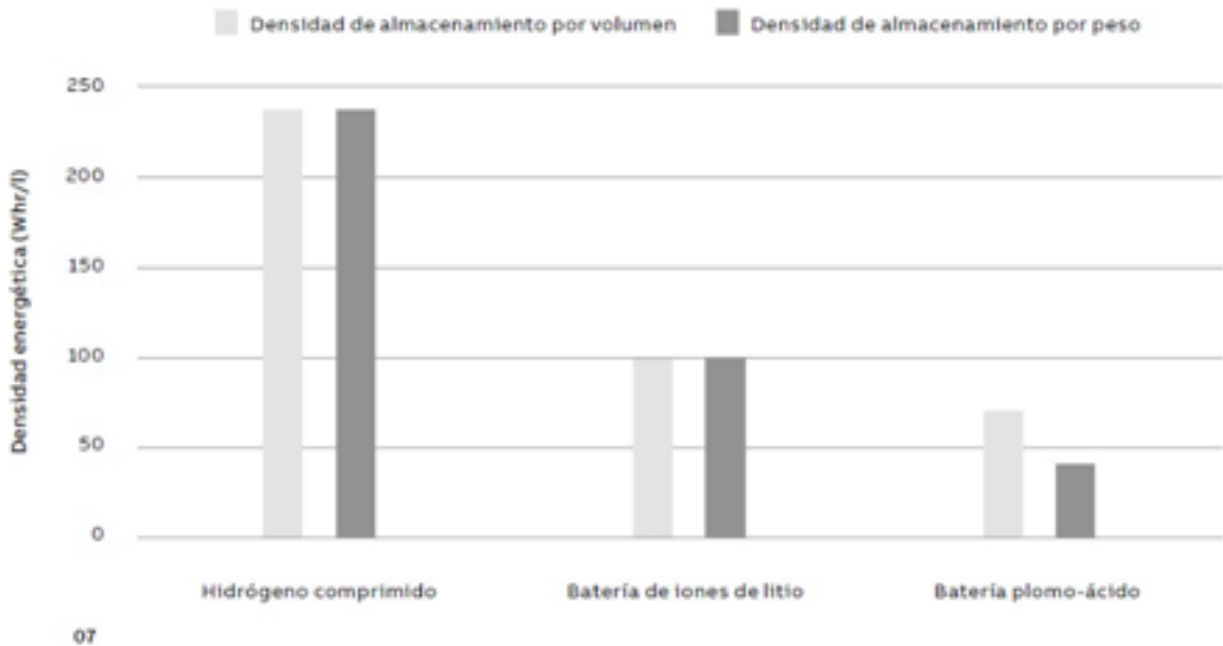
Las baterías de litio son una tecnología fundamental en el mundo actual, presentes en una amplia gama de dispositivos, desde teléfonos móviles hasta vehículos eléctricos. Su alta densidad energética, eficiencia y larga vida útil las convierten en una opción atractiva para el almacenamiento de energía, sin embargo, tienden a funcionar como energía de respaldo en su mayoría o para dispositivos de pequeña magnitud, de hecho, la segmentación del mercado actual de estas baterías está dispuesto de la siguiente manera según Statista (2023):

- Electrónica portátil: 34.5%
- Vehículos eléctricos: 29.1%
- Almacenamiento de energía a gran escala: 18.7%

Esto se explica debido a que es funcional para almacenar y transmitir energía, pero se ve limitada por su tamaño, además que el tiempo de carga es lento. Se procedió a realizar un cuadro comparativo, y luego cálculo aplicado al consumo promedio de los venezolanos. (Ver cuadro 17).

Cuadro 17: Comparativa del litio vs hidrógeno

Característica	Baterías de Litio	Pilas de Combustible de Hidrógeno
Costo	5-10 mil \$	25\$ - 35\$ mil \$
Mantenimiento	Bajo	Alto
Eficiencia	Alta 90%	Media 60%
Vida útil	Larga	Larga
Seguridad	Media	Alta
Impacto ambiental	Medio	Bajo
Tiempo de recarga	Varias horas	Minutos
Flexibilidad	Media	Alta
Emisión	Cero	Cero
Infraestructura	Desarrollada	En desarrollo
Espacio	Bajo	Alto



Fuente: Mahesh Vaze ABB Corporate Research Bangalore (2019)

Comparación entre una batería de litio de 5kWh y una pila de combustible de hidrógeno de 5kW en términos energéticos:

## Datos

Batería de litio de 5kWh

Pila de combustible de hidrógeno de 5kW con 50% de eficiencia

26 kg de hidrógeno

Consumo promedio de una casa de 1 kWh

## Duración:

Batería de litio:

5kWh / 1kWh = 5 horas de suministro

Pila de combustible de hidrógeno: 26 kg de hidrógeno \* 14.2kWh/kg \* 0.5 (eficiencia) = 190.4kWh

190.4kWh / 1kWh = 190.4 horas de suministro

En este caso, la pila de combustible de hidrógeno duraría 38 veces más tiempo que la batería de litio, sin embargo, hay que tener en cuenta los factores mencionados en el cuadro anterior.

En este caso, la pila de combustible de hidrógeno duraría 38 veces más tiempo que la batería de litio. Ahora se hace referencia al tiempo de recarga y números de carga por día, a manera de calcular su vida útil trabajando a máxima potencia. Cabe destacar, que el tiempo de recarga puede variar entre 1 y 4 horas, dependiendo del tipo de cargador utilizado, si es de 5kW puede tardar entre 2 y 4 horas en recargarse con un cargador estándar, y entre 1 y 2 horas con un cargador rápido, aunque si está completamente descargada puede tardar hasta un 50% más en recargarse que una batería parcialmente descargada, adicionalmente se debe tomar en cuenta que la temperatura afecta el tiempo de carga, todo lo dicho validado por la International Energy Agency: IEA. Suponiendo un consumo de 20kWh / día sería necesario 4 cargas de la batería, y que las baterías de litio-ión son las más comunes con una vida útil, generalmente entre 300 y 500 ciclos de carga y descarga, se realizó el siguiente cálculo para hacer la comparación respecto a la pila de combustible de hidrógeno, la cual tiene un tiempo de vida útil entre 5000 a 10000 horas como se mostró en el cuadro 4. Con esta información se realizó el siguiente cálculo:

**Capacidad de la batería:** 500 ciclos

**Número de recargas por día:** 4 recargas/día

**Vida útil (días) = Capacidad de la batería (ciclos) / Número de recargas por día**

**Vida útil (días) = 500 ciclos / 4 recargas/día**

**Vida útil (días) = 125 días = 3000 h**

La vida útil gira en torno a los 3000h lo cual sería menor a la duración mínima de la pila de combustible, considerando un uso continuo, cabe acotar la batería no puede ofrecer un funcionamiento continuo, debido a los tiempos de recarga. Por último, respecto al impacto ambiental, el hidrógeno tiene todas las de ganar en cuanto al reciclaje, se estima que solo el 5% de las baterías de litio se reciclan al final de su vida útil.

En resumen, las pilas de combustible de hidrógeno son más eficientes y ecológicas, pero tienen una infraestructura limitada, mientras que las baterías de litio tienen una infraestructura bien desarrollada, pero son menos eficientes y pueden tener un impacto ambiental negativo.

#### **4.4.1 Otras comparativas**

##### **Los paneles solares**

Un panel solar, también llamado módulo fotovoltaico, es un dispositivo que convierte la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. El efecto fotovoltaico es un fenómeno físico en el cual la luz solar golpea materiales semiconductores (como el silicio) y libera electrones, creando una corriente eléctrica.

Tomando en consideración un panel solar con una potencia de 500 W<sub>p</sub>, este puede producir alrededor de 1 kWh por día en condiciones ideales. Por ello, se necesitarían aproximadamente 20 paneles para cubrir la demanda energética de 20kWh. Para ello, se necesitaría un espacio de aproximadamente 40 metros cuadrados, incluyendo el espacio entre los paneles, ya que cada panel abarca casi 2 metros cuadrados. Esto desestima el análisis como solución energética para un hogar.

##### **Turbinas de gas**

Las turbinas de gas son un tipo de motor térmico que convierte la energía térmica en energía mecánica. Funcionan utilizando el principio del ciclo Brayton, que consiste en cuatro etapas:

- 1. Compresión:** El aire se aspira y se comprime en un compresor.
- 2. Combustión:** El aire comprimido se mezcla con combustible y se quema en una cámara de combustión.
- 3. Expansión:** Los gases calientes de la combustión se expanden a través de una turbina, que gira un rotor.
- 4. Escape:** Los gases de escape se liberan al ambiente.

Una vez descrito el concepto, se decidió realizar un cuadro comparativo para analizar las carencias o ventajas de la turbina de gas, enfrentando la pila de combustible de hidrógeno. Los

criterios analizados son tecnología, eficiencia, combustible, emisiones, ruido, costo, espacio, escalabilidad, modularidad. (Ver cuadro 18)

Cuadro 18: Turbina de gas vs PCH

Criterio	Turbina de gas	Pila de combustible de hidrógeno
Tecnología	Madura, bien establecida	En desarrollo, no tan extendida
Eficiencia	Alta (hasta 60%)	Menor (actualmente alrededor del 40-60%)
Combustible	Gas natural, gasóleo, biocombustibles	Hidrógeno
Emisiones	Emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes	Solo agua como subproducto
Ruido	Ruidoso	Silencioso
Costo	Alto costo inicial y de mantenimiento	Alto costo inicial y de mantenimiento
Espacio	Requiere espacio considerable	Requiere menos espacio
Escalabilidad	Disponible en una variedad de tamaños	Disponible en una variedad de tamaños
Modularidad	No modular	Modular

Fuente: Eduardo Prato (2024), Gevernova (2024), Fuelcellenergy (2024).

En primer lugar, se decidió analizar los aspectos negativos de la turbina en relación al uso residencial, por lo cual, se percibió que no cuenta con las características adecuadas para su uso.

Entre ellas están:

**Ruido:**

- Las turbinas de gas emiten un ruido considerable, entre 80 y 100 decibelios a una distancia de 1 metro.
- Este ruido puede ser molesto para los residentes y vecinos, especialmente durante la noche.
- Se requieren medidas de aislamiento acústico para reducir el ruido a un nivel aceptable, lo que aumenta el costo de la instalación.

**Espacio:**

- Las turbinas de gas son voluminosas y requieren un espacio considerable para su instalación.
- Se necesita una superficie de al menos 100 metros cuadrados para una turbina de tamaño pequeño.
- La altura de la turbina también puede ser un problema, ya que puede superar los 5 metros.

**Emisiones:**

- Las turbinas de gas emiten gases de efecto invernadero y otros contaminantes, como óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono.
- Estas emisiones pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente y la salud pública.
- Se pueden instalar sistemas de control de emisiones para reducir las emisiones, pero esto aumenta el costo de la instalación.

**Seguridad:**

- Las turbinas de gas son equipos complejos que pueden ser peligrosos si no se operan correctamente.
- Se requiere personal capacitado para operar y mantener las turbinas de gas.
- Deben implementarse medidas de seguridad para evitar accidentes.

En definitiva, las turbinas de gas no son una opción ideal para la mayoría de los hogares debido a su ruido, tamaño, emisiones, costo y riesgos de seguridad. Por ello, se descartó como opción.

**4.4.2 Viabilidad económica**

A través de este proceso se decidió determinar si un sistema de generación de energía a través de una pila de combustible de hidrógeno es viable económicamente para uso residencial, para ello fue utilizado el LCOE (Levelized Cost of Energy), una medida usada para evaluar y comparar diferentes métodos de producción de energía. Se expresa como un costo promedio por unidad de energía generada a lo largo de la vida útil de una planta de energía. En español, también se le conoce como "Costo Nivelado de la Electricidad" o "Costo Nivelado de la Generación".

El LCOE permite comparar el costo total de generación de electricidad durante la vida útil de diferentes tecnologías de generación de energía en cada caso, como la solar, la eólica, la nuclear y el carbón. Esto ayuda a los gobiernos, empresas de servicios públicos y empresas privadas a tomar decisiones informadas sobre la mejor tecnología para invertir. Además, ayuda a evaluar la

rentabilidad a largo plazo de una inversión, al considerar todos los costos incurridos durante la vida útil de la pila, el LCOE indica si la inversión será financieramente viable.

Para realizar el estudio, se realizó una búsqueda para determinar el costo real o estimado de cada uno de los equipos, así como también costo de instalación y mantenimiento, se decidió tomar el tiempo de operación como el tiempo de vida útil mínimo de la pila de combustible, siendo utilizado como energía secundaria durante un año.

**Costos:**

**Costo de la pila de combustible EFOY de 5kW:**

Para determinar el costo se aproximó a través de pilas de combustible de 5kW PEM. (ver figura 16)

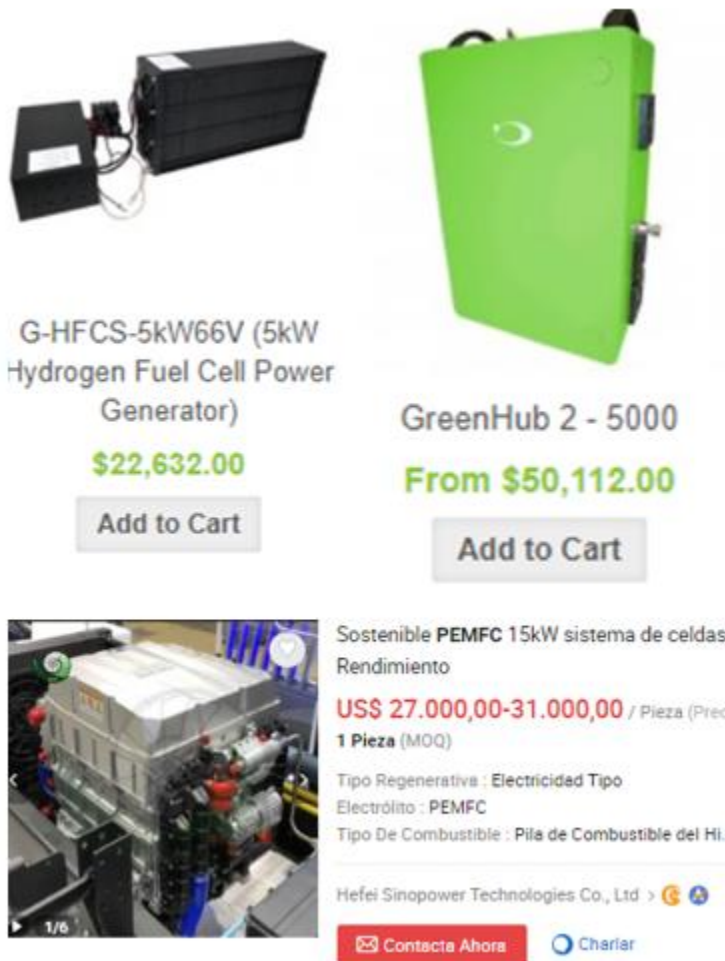


Figura 16: Precios pilas de combustible

Fuente: Made in china (2024)

Adicionalmente, se contactó a la empresa Aircell, para estimar el precio de una pila de combustible similar de 3kW (ver figura 16).

Name / Code	Description	Qty	Unit price	Sales tax	Line total
Aircell 3000	Fuel cell system with nominal power 3000 W. Stack technology: open cathode PEM fuel cell Number of cells: 80 Cooling: Air Power supply : 24 Vdc Power output: 0-50 A (max. 65A) - Unregulated voltage 56-80 Vdc Communication: Canbus 2.0A Hydrogen sensor: included	1,00	15 860,00 <i>Unit</i>	20,00 % <i>(3 172,00)</i>	15 860,00
MES-ACS3000	<b>ACS 3000 Commissioning:</b> On-site support service at the commissioning of ACS 3000	1,00	1 500,00 <i>Unit</i>	20,00 % <i>(300,00)</i>	1 500,00
Formation-ACS	<b>AIRCELL Technical Training:</b> 5 people maximum Location: H2SYS Technical Service (Belfort)	1,00	1 500,00 <i>Unit</i>	20,00 % <i>(300,00)</i>	1 500,00
Forfait Assistance Technique	<b>Technical assistance package following installation in service.</b> Including 8h of technical support. Valid 12 months from commissioning.	1,00	1 500,00 <i>Unit</i>	20,00 % <i>(300,00)</i>	1 500,00

Notes :	
Transport not included	

<b>Total</b>	<b>20 360,00 €</b>
Sales tax 20,00%	4 072,00 €
<b>Total due</b>	<b>24 432,00 €</b>

Figura 17: Presupuesto aircell

Fuente: Aircell (2024)

El precio de la pila sin tomar en cuenta los agregados es 15.860 dólares, tomando en consideración el precio por 1kW, para 5kW sería 26.433,33 euros, haciendo la conversión a dólares el valor es 28.925,1 dólares.

Totalizando los precios mostrados y dividiendo entre ellos, se tiene:

$$\text{Precio estimado} = (22.632 + 50.112 + 29.000 + 28.925,1) / 4 = 130.669.1 / 4 = 32.667.275$$

Precio estimado = 33.000 dólares.

### Costo del inversor PowMr

El costo es 688\$ (Ver figura 18).

Inversor solar de 5000 W 48 V fuera de la red, inversor de onda sinusoidal pura de 120 VCA, inversor solar de 48 V con cargador MPPT, inversor todo en uno de 5000 W para el hogar, RV, camión, fuera de la red, plomo-ácido/litio

Visita la tienda de PowMr

3.6 ★★★★★ 97 calificaciones | [Buscar en esta página](#)

US\$ **688**<sup>89</sup>

US\$225.79 de envío y depósito de derechos de importación a Venezuela [Detalles](#)

Figura 18: Precio inversor

Fuente: Amazon (2024)

### Costo del sistema de seguridad

El costo del detector de gas considerado es de 100\$. (Ver figura 19)

Monitor de gas de alta calidad Dispositivos de detección de fugas de gas H2 H2s Nh3 Ch4 C2h2 Detector de gas con sensor Honeywell

No hay reseñas aún



Cantidad mínima de pedido:  
**USD 100,00**

#### Variaciones

Opciones totales: 1 Rang

1. Rango de medición(1): 0-

0-100%LEL

2. Precisión(1)

1%LEL

#### Envío

Las soluciones de envío no están disponibles act

[Iniciar solicitud de pedido](#)

¿Sigues decidiendo? ¡Co [muestra](#)

Obtener US \$50.00 I

Figura 19: Precio Detector

Fuente: alibaba (2024)

### **Costo de la bombona:**

Fue estimado tomando en cuenta varios factores:

#### **Proveedores**

- **Estados Unidos:**
  - **Airgas:** 250 USD por una bombona de 50L de hidrógeno vacía
  - **Praxair:** \$300 USD por una bombona de 50L de hidrógeno vacía
- **Reino Unido:**
  - **BOC:** £200-£300 GBP por una bombona de 50L de hidrógeno vacía
  - **Air Products:** £250-£350 GBP por una bombona de 50L de hidrógeno vacía
- **España:**
  - **Carbueros Metálicos:** €200-€300 EUR por una bombona de 50L de hidrógeno vacía
  - **Praxair:** €250-€350 EUR por una bombona de 50L de hidrógeno vacía

El precio de las bombonas varía según el fabricante, la calidad del material, la capacidad y las características adicionales. En general, el precio por bombona de 50L de alta presión oscila los 250\$

#### **Costo de envío:**

- El costo de envío depende del método de transporte elegido (marítimo, aéreo o terrestre), la distancia, el peso y el volumen de la carga. Para 6 bombonas de 50L, el costo de envío marítimo podría ser de \$500 a \$1000 USD.

#### **Impuestos y aranceles:**

- Al importar a Venezuela, se deben pagar impuestos y aranceles de aduana. El porcentaje varía según el tipo de producto y el valor CIF (Costo, Seguro y Flete). En este caso, se estima un arancel del 20% y un IVA del 16%.

#### **Otros costos:**

- Es posible que haya que pagar otros costos adicionales, como:
  - **Gastos de gestión aduanera:** \$50 a \$100 USD
  - **Seguro de carga:** 1% del valor CIF
  - **Embalaje y etiquetado:** \$50 a \$100 USD

#### **Cálculo del precio total:**

**Costo total = Costo de las bombonas + Costo de envío + Impuestos + Aranceles + Otros costos**

- **Costo de las bombonas:** 6 bombonas x \$250 USD/bombona = \$1500 USD
- **Costo de envío:** \$500 USD
- **Impuestos:** (\$1500USD + \$500 USD) x 20% = \$400 USD
- **Aranceles:** (\$1500 USD + \$500 USD) x 16% = \$320 USD
- **Otros costos:** \$100 USD

**Precio total:** \$1500 USD + \$500 USD + \$400 USD + \$320 USD + \$100 USD = **\$2820 USD**

También se encontraron precio al mayor por fabricantes chinos que podrían bajar el costo de las bombonas significativamente, como se muestra en la figura 20.

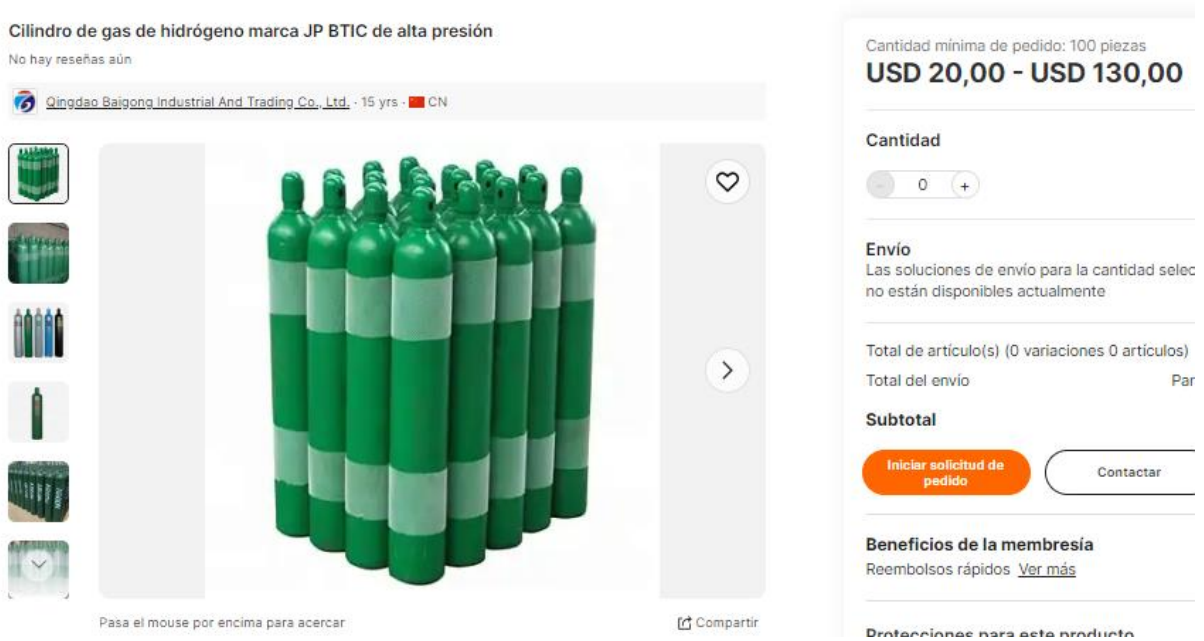


Figura 20: Precio bombonas

Fuente: Alibaba (2024)

### Costo de instalación

De acuerdo a la figura 16, se considera un costo de instalación de 5000\$ englobando todas las operaciones pertinentes.

### Costo anual de mantenimiento

El fabricante EFOY cuenta con planes de mantenimiento por año.

- **Estados Unidos:**
  - **EFOY USA:** \$750 USD por un plan de mantenimiento anual básico
  - **PowerTech:** \$1500 USD por un plan de mantenimiento anual completo

- **Reino Unido:**
  - **EFOY UK:** £500-£1000 GBP por un plan de mantenimiento anual básico
  - **Fuel Cell Systems:** £1000-£2000 GBP por un plan de mantenimiento anual completo
- **España:**
  - **EFOY España:** €500-€1000 EUR por un plan de mantenimiento anual básico
  - **H2B2:** €1000-€2000 EUR por un plan de mantenimiento anual completo

Se estima un precio para Venezuela parecido al de USA, de 1500 dólares

### **Resumen de costos asociados**

Pila de combustible EFOY de 5kW = 33000\$

6 bombonas de alta presión = 2820\$

Inversor PowMr = 688\$

Sensor = 100\$

Mantenimiento = 1500\$

Instalación = 5000\$

### **Producción de energía:**

Capacidad de la pila de combustible: 5 kW

Horas de operación anual: 5,000 horas

### **Precio del combustible**

El grado mínimo es 3.0.

- **Estados Unidos:**
  - **Airgas:** \$7.50 USD por kg de hidrógeno a 300 bar (grado 4.5)
  - **Praxair:** \$8.50 USD por kg de hidrógeno a 300 bar (grado 5.0)
- **Reino Unido:**
  - **BOC:** £5-£7 GBP por kg de hidrógeno a 300 bar (grado 4.5)
  - **Air Products:** £5.50-£7.50 GBP por kg de hidrógeno a 300 bar (grado 5.0)
- **España:**
  - **Carburos Metálicos:** €5-€7 EUR por kg de hidrógeno a 300 bar (grado 4.5)
  - **Praxair:** €5.50-€7.50 EUR por kg de hidrógeno a 300 bar (grado 5.0)

Precio del hidrógeno: \$10/kg

Para producir 25000 kWh se necesitan 1.125 kg de hidrógeno

Total = 11.250 \$

### **Cálculo:**

Costo total del sistema:

Costo total = Costo de inversión + Costo de instalación y mantenimiento + costo del combustible

Costo total = 33.000 + 2.820 + 688 + 100 + 1.500 + 5.000 + 11.250 = \$ 54.358

Agregando gastos inesperados, seguridad financiera, se agregó un 20% adicional.

Margen = 10.871,6

**Costo total acumulado = \$ 65.229,6**

**Aproximado = \$ 65.200**

### **Producción anual de energía:**

Producción anual = Capacidad de la pila de combustible x Horas de operación anual

Producción anual = 5 kW x 5,000 horas = 25,000 kWh

Costo nivelado de la energía (LCOE):

LCOE = (Costo total + Costo anual de mantenimiento) / Producción anual

LCOE = (\$65.200 + \$1.500) / 25,000 kWh = \$ 2,68 / kWh

Cuadro 19: Resumen de costos

Componente	Precio (USD)
Pila de combustible EFOY de 5kW	\$33,000.00
6 bombonas de alta presión	\$2,820.00
Inversor PowMr	\$688
Sensor	\$100
Mantenimiento	\$1,500.00
Instalación	\$5,000.00
Precio del hidrógeno (1.125 kg)	\$11,250.00
Costo total de inversión	\$44,158.00
Costo total del sistema	\$65.229,6
Producción anual de energía	25.000 kWh
Costo nivelado de la energía (LCOE)	\$2,68 / kWh

Fuente: Eduardo Prato (2024)

### **Comparación con otras alternativas:**

El LCOE de un sistema de generación de energía a través de una pila de combustible de hidrógeno es comparable a mayor escala al LCOE de otras tecnologías de generación de energía renovable, como la energía solar y la eólica. Sin embargo, el LCOE del hidrógeno puede ser más alto que el LCOE de las centrales eléctricas de combustibles fósiles e incluso otras energías renovables con el costo obtenido. En comparación con las baterías de litio, las pilas de combustible tienen ventaja puesto que, la relación de las baterías de litio oscila entre \$100-\$300 USD/kWh.

### **Sensibilidad del análisis:**

El LCOE del sistema de hidrógeno es sensible a la variación de los parámetros clave, como el costo del hidrógeno, la producción de energía y el costo de los equipos, debido a la variabilidad de precios existentes en el mercado. Ahora bien, se percibió que la viabilidad económica de la utilización de las pilas de combustible depende de la reducción del costo del hidrógeno y el aumento de la producción de energía.

#### **4.4.3. Viabilidad Ambiental**

Para evaluar la sostenibilidad ambiental del proyecto se ejecutó una matriz de evaluación de sostenibilidad del sistema de generación de energía, partiendo del uso el electrolizador Nel H6, bombonas de gas de 300 bar, pila de combustible de hidrógeno EFOY 5 Kw, inversor solar. Para ello, se evaluaron los criterios que afectan al medio ambiente, el impacto social e incluso el aprovechamiento de esta energía usando recursos naturales.

#### **Criterios de evaluación:**

- **Impacto ambiental:**
  - Emisión de gases de efecto invernadero
  - Consumo de recursos naturales
  - Generación de residuos
  - Contaminación del aire, agua y suelo
  - Afectación a la biodiversidad
- **Eficiencia energética:**
  - Relación entre la energía utilizada y la energía producida
  - Pérdidas de energía en el proceso de generación y almacenamiento

- **Impacto social:**
  - Creación de empleos
  - Acceso a la energía
  - Salud y seguridad
  - Desarrollo de la comunidad
- **Costo:**
  - Inversión inicial
  - Costos de operación y mantenimiento
  - Vida útil del sistema

**Escala de evaluación:**

- 1: Muy bajo
- 2: Bajo
- 3: Medio
- 4: Alto
- 5: Muy alto

Para cada criterio, se definieron subcriterios e indicadores específicos para realizar la evaluación. Se asignó una escala de evaluación de 1 a 5 a cada indicador, siendo 1 el valor más bajo y 5 el valor más alto. La puntuación total para cada criterio se calculó multiplicando la ponderación del criterio por las puntuaciones de los indicadores y la puntuación total del sistema se calculó como la suma de las puntuaciones de cada criterio. (Ver cuadro 20)

Cuadro 20: Matriz de sostenibilidad

criterio	Ponderación	Evaluación	Impacto total
<b>Impacto ambiental</b>	<b>50%</b>		
- Emisión de gases de efecto invernadero	10%	5 (si se utiliza energía renovable)	50
- Consumo de recursos naturales	10%	4	40
- Generación de residuos	10%	2	20
- Contaminación del aire, agua y suelo	10%	4	40
- Afectación a la biodiversidad	10%	2	20
<b>Eficiencia energética</b>	<b>20%</b>		
- Relación entre la energía utilizada y la energía producida	10%	3	30
- Pérdidas de energía en el proceso de generación y almacenamiento	10%	3	30
<b>Impacto social</b>	<b>20%</b>		
- Creación de empleos	5%	3	15
- Acceso a la energía	5%	4	20
- Salud y seguridad	5%	4	20
- Desarrollo de la comunidad	5%	3	15
<b>Costo</b>	<b>10%</b>		
- Inversión inicial	4%	2	8
- Costos de operación y mantenimiento	3%	4	12
- Vida útil del sistema	3%	4	12
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>		<b>332</b>

Fuente: Eduardo Prato (2024), Bloom Energy (2024), Doosan (2024), Fuelcellenergy (2024), Jason Channell (2020), hydrogencouncil (2023), AIE (2023)

### Interpretación:

Impacto ambiental = 170 puntos

Eficiencia energética = 60 puntos

Impacto social = 70 puntos

Costo = 32 puntos

Puntuación total = 332 puntos

Puntuación máxima posible = 500 puntos

**Eficiencia = 66,4 %** (2/3 partes de los criterios considerados según su peso porcentual indican una viabilidad ambiental alta).

Tomando solo en consideración la afectación de la naturaleza, se puede decir que de los 250 puntos posible se obtuvo 170, dando un resultado de:

**Eficiencia sobre impacto ambiental = 68%**

Las áreas de impacto positivo son la emisión de gases de efecto invernadero (50), el consumo de recursos naturales (40), y la poca contaminación del aire, agua y suelos (40), mientras que las áreas de impacto negativo son la inversión inicial (8), costo de operación y mantenimiento (12) y la vida útil (12).

Las pilas de combustible de hidrógeno son una tecnología emergente con el potencial de revolucionar la forma en que se produce y consume energía. Estas pilas funcionan combinando hidrógeno y oxígeno para generar electricidad, calor y agua. El único subproducto de este proceso es agua pura, lo que las convierte en una alternativa limpia y sostenible a los combustibles fósiles.

Como muestra de los resultados anteriores, las estadísticas de descarbonización a partir de la utilización del hidrógeno, tomando en cuenta expectativas para los próximos años, tomados del consejo del hidrógeno, la agencia internacional de la energía y el foro económico mundial.

Se espera que la producción y demanda de hidrógeno verde crezca exponencialmente en la próxima década, las estimaciones están basadas en el siguiente cuadro (Ver cuadro 21):

Cuadro 21: Progreso del hidrógeno

Aspecto	2022	2025 (estimado)	2030 (estimado)
Producción			
Capacidad global de hidrógeno	120 Mtpa	N/A	N/A
Hidrógeno verde	0.1 Mtpa	5.6 Mtpa	100 Mtpa
Inversión en producción de hidrógeno verde	\$1.2 billones	N/A	N/A
Demanda			
Demanda global de hidrógeno	70 Mtpa	N/A	N/A
Sectores con mayor demanda	Refinería de petróleo (34%), producción de amoníaco (20%), industria química (18%)	N/A	N/A
Demanda de hidrógeno verde	N/A	N/A	60 Mtpa
Infraestructura			
Número de estaciones de servicio de hidrógeno	680	N/A	N/A
Inversión en infraestructura de hidrógeno	\$35 billones	N/A	N/A
Impacto ambiental			
Reducción de emisiones de CO2	N/A	N/A	830 Mtpa
Costos			
Costo de producción de hidrógeno verde	\$3-6/kg	N/A	\$1.5-2.5/kg
Costo de los vehículos de hidrógeno	\$50,000-70,000	N/A	\$30,000-40,000
Políticas			
Número de países con estrategias nacionales de hidrógeno	35	N/A	N/A

Fuente: hydrogencouncil (2024)

### **Políticas:**

- ✓ Número de países con estrategias nacionales de hidrógeno: 35 en 2022.
  - Ejemplos de proyectos:
- ✓ Proyecto HyDeal España: Producción de hidrógeno verde a partir de energía solar en España.
- ✓ Proyecto NEOM: Ciudad del futuro en Arabia Saudita que utilizará hidrógeno como fuente de energía principal.

Según los datos anteriores, se pudo observar que, en términos de producción global de hidrógeno, en 2022 fue de 120 Mtpa, con solo 0.1 Mtpa siendo hidrógeno verde, debido al reciente uso de la tecnología, se espera un crecimiento significativo del hidrógeno verde, alcanzando 5.6 Mtpa en 2025 y 100 Mtpa en 2030, impulsado por una inversión de \$1.2 billones entre 2020 y 2030. Esto debido a que hay 680 estaciones de servicio de hidrógeno en el mundo, con una inversión prevista de \$35 billones en infraestructura de hidrógeno entre 2020 y 2030. Todo esto, cuenta con el objetivo primordial de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en 830 Mtpa en 2030. Para ello, el costo de producción de hidrógeno debe disminuir, el costo del hidrógeno verde en 2022 era de \$3-6/kg, la reducción esperada es de \$1.5-2.5/kg en 2030. Ya 35 países ya han implementado estrategias nacionales de hidrógeno, lo que impulsa el desarrollo de esta energía a través de las pilas de combustible y electrolizadores, por ejemplo, el proyecto HyDeal en España, el cual busca producir hidrógeno verde a partir de energía solar, mientras que, el proyecto NEOM en Arabia Saudita planea ser una ciudad del futuro que use hidrógeno como fuente de energía principal.

La descarbonización a partir del hidrógeno está en sus primeras etapas, pero se observa un rápido crecimiento en la producción, demanda e infraestructura de hidrógeno verde. El hidrógeno verde tiene un gran potencial para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, aunque aún existen desafíos en cuanto a costos y desarrollo de infraestructura. Todo el esfuerzo está basado no solo en su potencial energético, sino realmente, en la sostenibilidad del proceso, el cual puede llegar a producir energía sin producir emisiones de gases de efecto invernadero en su totalidad.

Según expertos, el hidrógeno verde se perfila como una herramienta fundamental para alcanzar la descarbonización y mitigar el cambio climático. Su potencial para contribuir a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> es significativo, estimándose que podría aportar hasta el 20% de la reducción total necesaria para el año 2050. Un informe reciente destaca el rol fundamental del hidrógeno verde y bajo en carbono como complemento a otras tecnologías de descarbonización.

Este estudio indica que el hidrógeno ofrece la única opción viable a largo plazo para lograr una descarbonización profunda en sectores como el del acero, el marítimo, el de la aviación y el del amoníaco.

Para el año 2050, se estima que el hidrógeno podría evitar 80 gigatoneladas (GT) de emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub>, contribuyendo con un 20% a la reducción total necesaria. Sin embargo, esto requiere del uso de 660 millones de toneladas métricas (MT) de hidrógeno renovable y bajo en carbono, lo que representa un 22% de la demanda mundial de energía final.

Todo esto según McKinsey & Company y el Hydrogen Council, en su informe Net-Zero (2024) ("Hydrogen for Net Zero"), donde, también resalta el notable impulso que ha experimentado el hidrógeno en los últimos años. Las estimaciones de capacidad de producción para el año 2030 se han triplicado cada año desde 2019, y los proyectos maduros con financiación ya suman más de 80.000 millones de dólares.

## CONCLUSIONES

A forma de concluir, se hace imprescindible relatar la importancia de la fase I en términos de viabilidad y desarrollo del proyecto, por ello se demostró como los electrolizadores son una herramienta eficaz de producción de hidrógeno, más allá de los retos económicos y de transporte del combustible que presenta, su generación es posible en términos de calidad y cantidad con las tecnologías existentes como en el caso del compacto generador Nel H6 series, el cual en 24 horas puede producir hasta 13 kg de hidrógeno, lo cual respecto a un consumo diario de la población escogida de alto rango, podría abastecer de forma continua a un hogar, o incluso dos hogares tomando el promedio dentro de rangos normales establecido en 18 kWh / día.

En segundo lugar, se tomó como prioridad elegir el mecanismo de generación de energía basado en celdas de hidrógeno en la fase II, que tuviera la capacidad energética y condiciones necesarias para abordar las limitaciones de las zonas residenciales, afrontando los desafíos de espacio e instalación según normas venezolanas, logrando determinar que no por casualidad las PEMFC es el método más usado en el mundo, dando una relación de eficiencia, potencia y tamaño por encima de sus competidoras.

En la fase III, se logró seleccionar la pila de combustible de hidrógeno EFOY, en función de los requerimientos energéticos, dando holgura para aguantar picos de carga y además para abastecer de forma no solo alternativa sino continua un hogar. Y en torno a esta selección, y con los cálculos pertinentes, se llegó a seleccionar el resto de equipos congruentes en términos de potencia, voltaje, eficiencia y seguridad, entre ellos los equipos fundamentales para la equipación y generación del sistema.

Por último, en la fase IV hubo cabida para comparar este sistema de generación de energía limpia y sostenible con otras alternativas para dar a conocer su posición como solución viable y prometedora a aplicar en Venezuela, y en el resto del mundo.

Se concluye en el presente proyecto que la utilización de celdas de hidrógeno a través de pilas de combustible como sistema de generación de energía eléctrica no solo es sostenible sino aplicable a sectores residenciales por encima de otras alternativas no sustentables para el medio ambiente, si se cuenta con el mecanismo económico para impulsar esta tecnología, y aprovechar la gran capacidad energética de un combustible que promete ser el usado en infinidad de aplicaciones.

## RECOMENDACIONES

Las recomendaciones se ordenaron en base a las diferentes etapas que abarca su uso, así como también, la importancia de cada parte de su funcionamiento.

### **Instalación:**

Seleccionar un espacio ventilado y con acceso al exterior para la instalación de la pila de combustible y las bombonas de hidrógeno.

Asegurar una temperatura ambiente adecuada para el óptimo funcionamiento del sistema (rango recomendado por el fabricante).

Proteger el sistema de la humedad excesiva y la exposición directa a la luz solar.

Minimizar la exposición a vibraciones y golpes que puedan afectar la integridad del sistema.

### **Conexión eléctrica:**

Utilizar cables de la sección adecuada para la corriente nominal del sistema.

Instalar un interruptor de circuito y protecciones eléctricas para evitar sobrecargas y cortocircuitos.

Conectar el inversor a la red eléctrica siguiendo las instrucciones del fabricante.

Realizar pruebas de funcionamiento y medición de la tensión y la frecuencia de la corriente eléctrica.

### **Seguridad:**

Instalar detectores de fugas de hidrógeno y alarmas para garantizar la seguridad en caso de emergencia.

Contar con extintores de incendios adecuados para la extinción de fuegos de tipo eléctrico.

Capacitar al personal en el manejo y operación segura del sistema, incluyendo las medidas de emergencia.

Seguir las normas y regulaciones locales de seguridad para la instalación de sistemas de generación de energía.

### **Operación:**

Encender y apagar el sistema siguiendo las instrucciones del fabricante.

Monitorear el funcionamiento del sistema a través de los indicadores y alarmas disponibles.

Registrar las incidencias y el rendimiento del sistema para optimizar su operación.

**Suministro de hidrógeno:**

Utilizar bombonas de hidrógeno de alta pureza y certificadas para su uso con pilas de combustible PEMFC, estipuladas en el proyecto.

Almacenar las bombonas en un lugar seguro y ventilado, siguiendo las recomendaciones del fabricante.

Manipular las bombonas con cuidado y siguiendo las normas de seguridad.

Realizar un control periódico del nivel de hidrógeno en las bombonas.

**Mantenimiento:**

Seguir las recomendaciones del fabricante para el mantenimiento preventivo del sistema.

Reemplazar los filtros de agua y aire de forma regular.

Limpiar los componentes del sistema según las instrucciones del fabricante.

Calibrar los sensores y equipos de medición del sistema.

Contratar personal calificado para realizar el mantenimiento correctivo del sistema.

**Ventilación:**

Asegurar una ventilación adecuada en el espacio donde se utiliza el sistema para evitar la acumulación de hidrógeno.

Instalar un sistema de ventilación mecánica si es necesario.

Extractores especiales para maximizar la seguridad

**Precauciones:**

No fumar ni utilizar fuego cerca del sistema o de las bombonas de hidrógeno.

No exponer el sistema a temperaturas extremas o ambientes corrosivos.

No abrir o modificar el sistema sin autorización del fabricante.

No utilizar el sistema si presenta daños o fugas de hidrógeno.

**Económico:**

Producir a gran escala para obtener una mejor relación de precio por unidad de energía.

## REFERENCIAS

- Agencia Internacional de la Energía. (2023). Global demand for pure hydrogen 1975-2018. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-demand-for-pure-hydrogen-1975-2018>
- Alibaba. (2023). Prostar factory price 5kw 24v 48v. <https://www.truckpaper.com/listings/for-sale/international/prostar/trucks-and-trailers>
- Arias, F. (2012). El Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica. 6ta Edición. Editorial Episteme. Caracas, Venezuela.
- Asamblea Nacional de Venezuela. (2022). Ley Orgánica de Hidrocarburos Gaseosos. [http://www.pdvsa.com/images/pdf/marcolegal/LEY\\_ORGANICA\\_DE\\_HIDROCARBUROS\\_GASEOSOS.pdf](http://www.pdvsa.com/images/pdf/marcolegal/LEY_ORGANICA_DE_HIDROCARBUROS_GASEOSOS.pdf)
- Atlas Copco. (2023). Soluciones para la industria del hidrógeno. <https://www.fires.es/es/blog/noticias/soluciones-para-hidrogeno>
- Ballard Power Systems. (2023). FCvelocity-9SSL Datasheet. [https://www.ballard.com/about-ballard/publication\\_library/product-specification-sheets/fcvelocity-9ssl-spec-sheet](https://www.ballard.com/about-ballard/publication_library/product-specification-sheets/fcvelocity-9ssl-spec-sheet)
- Bielsa A (2017) titulado: Caracterización y adquisición del comportamiento de una celda de combustible para la valoración de la eficiencia energética en un motor eléctrico a escala”. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/116390>
- Bloom Energy. (2023). Hydrogen Data Sheet. <https://www-s.mechse.uiuc.edu/cleanroom/files/Current%20MSDS/Hydrogen.pdf>
- Bloom Energy. (2023). Technology. <https://www.bloomenergy.com/>
- Capra (1996). Legislación Empresarial <https://legislacionempresarialgga.blogspot.com/2011/02/los-modelos-yo-paradigmas-gerenciales.html>
- Catalysts (2022). Breve reseña sobre sensores de hidrógeno electroquímicos de alta temperatura <https://www.mdpi.com/2073-4344/12/12/1647>
- Celdas de Combustible (2007). Celdas de Combustible. Consultado el 15 de junio del 2008 desde [http://www.claudio-otero.cl/fuel\\_cells/](http://www.claudio-otero.cl/fuel_cells/).
- Centro Nacional del Hidrogeno (2021) Pilas de combustible. <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>

Científica Sol. (2023). ¿Qué tipo de sensor es el más adecuado para detectar hidrógeno?  
<https://premac.co/detector-de-hidrogeno/>

David Nuevo, Tecpa (2023) La pila de combustible.

Detectores. (2023). Detector Fijo de Hidrógeno. <https://www.detectores.cl/tienda/detector-fijo-de-hidrogeno/>

Doosan Fuel Cell. (2023). Doosan Fuel Cell Products. <https://www.doosanfuelcell.com/>

Ecoinventos (2023) Generador portátil de pila de combustible de hidrógeno de 400 W.  
<https://ecoinventos.com/powerup-energy-technologies-up400/>

Economic Times Bureau, “India’s energy consumption to grow faster than major economies,” (2017). [economictimes.indiatimes.com/industry/energy/oil-gas/indias-energy-consumption-to-grow-faster-than-major-economies/articleshow/56800587.cms?from=mdr](http://economictimes.indiatimes.com/industry/energy/oil-gas/indias-energy-consumption-to-grow-faster-than-major-economies/articleshow/56800587.cms?from=mdr)

Espinoza M. y Jaimes A. (2023) que titula su trabajo “Evaluación teórica de la obtención del hidrógeno verde mediante la foto-electrocatalisis como modelo híbrido de transición energética en Colombia” <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/d830e369-1eda-4d86-a95d-dfe3fb3e887f/content>

Facendo A, González F, Peraza C y Villanueva C. (2007). Caracterización de la Operación de Celdas de Combustible como Fuente de Generación de Electricidad. Universidad experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Instituto Tecnológico de Valencia, Universidad de Carabobo.

Fernández D. Las Celdas de Combustible, una Alternativa Ecoeficiente en la Generación de Energía Eléctrica, Revista Chilena de Ingeniería.  
<http://www2.ing.puc.cl/~iing/ed433/anales/celdasCombustible.htm>, Consultado en 24- 06- 2008.

Fuel Cell Energy. (2023). Sustainability. <https://investor.fce.com/press-releases/press-release-details/2022/FuelCell-Energy-Releases-Its-First-Sustainability-Report/default.aspx>

Fuel Cell Store. (2023). Fuel Cell Stacks. <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks>

Ginlong Technologies. (2023). SPF 3000-5000. <https://www.ginverter.com/products/spf-3000-5000-es>

Ginlong Technologies. (2023). SPF\_3000-5000\_ES\_Datasheet\_EN\_202203.pdf.  
<https://www.ginverter.com/products/spf-3000-5000-es>

- González F Longatt (2004). Modelo Dinámico para Celda de Combustible: Aplicación en Generación Distribuida. 1er congreso iberoamericano de estudiantes de Ingeniería eléctrica (ICIBELEC 2004). pp-55 - P-70.
- GoodWe LATAM. (2023). DNS-G3. <https://en.goodwe.com/dns-g3>
- Guía del consumidor de energía eléctrica en viviendas y oficinas (2004). <https://www.fau.ucv.ve/idec/pdf/guia.pdf>
- H2SYS. (2023). FT201-V2-082021-ENAIRCELL.pdf. [https://www.wika.ca/upload/DS\\_PE8605\\_en\\_co\\_57612.pdf?tabPage=7](https://www.wika.ca/upload/DS_PE8605_en_co_57612.pdf?tabPage=7)
- Handige Harry (2008) Reacción química y elementos componentes de la pila de hidrógeno. [https://es.wikipedia.org/wiki/Pila\\_de\\_combustible#/media/Archivo:Fuel\\_cell\\_ES.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible#/media/Archivo:Fuel_cell_ES.svg)
- Hurtado, J. (2000). El proyecto de investigación. Instituto Universitario de Tecnología Caripito - Sypal.
- Institute of Sustainable Energy Technology, University of Nottingham. (2016). State of art review full cell technologies in domestic built environment. [https://www.researchgate.net/publication/283078479\\_State\\_of\\_the\\_Art\\_Review\\_Fuel\\_Cell\\_Technologies\\_in\\_the\\_Domestic\\_Built\\_Environment](https://www.researchgate.net/publication/283078479_State_of_the_Art_Review_Fuel_Cell_Technologies_in_the_Domestic_Built_Environment)
- IRENA (2022). costos de producción de hidrógeno a partir de diferentes tecnologías, incluyendo electrolizadores y refinerías. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
- Komachine. (2023). Catalog-Bumha-PowerCell-S1.pdf. <https://bumhan.com/wp-content/uploads/sites/126/2021/02/PowerCell-S1.pdf>
- Kreuer K.-D, Van Nguyen Trung & Zhao T. S. (2007). Advances in Fuel Cell. vol 1. Matthew M. Mench. (2008). Fuel Cell Engines. John Wiley & Sons.
- Larminie J & Dicks A (2003). Fuel System Explained. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, England January 2003.
- LD Cylinder. (2023). LD Cylinder. <https://www.ldcylinder.com/>
- Logan Energy, “A case study on 300 kW Fuel Cell System installed at 20 Fenchurch Street.” (2018). [www.loganenergy.com/wp-content/uploads/2015/11/150818-20-Fen-church-Street-GW.pdf](http://www.loganenergy.com/wp-content/uploads/2015/11/150818-20-Fen-church-Street-GW.pdf)
- Lopéz M (2016). State of the Art Review: Fuel Cell Technologies in the Domestic Built Environment.

- NEL Hydrogen. (2023). H2Station. <https://www.h2stations.org/>
- NEL Hydrogen. (2023). H-Series Proton PEM Electrolysers. <https://nelhydrogen.com/product/h-series-electrolyser/>
- Observatorio Venezolano de servicios públicos (2020). Servicio de Energía Eléctrica. <https://www.observatoriovsp.org/electricidad/>
- Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP). [https://www.opec.org/opec\\_web/en/about\\_us/171.htm](https://www.opec.org/opec_web/en/about_us/171.htm)
- Pandectas Digital. (2023). Resolución N° 009. <https://www.gob.pe/institucion/minedu/normas-legales/2628812-009-2022-minedu>
- Petróleos de Venezuela, S.A. (2023). PDVSA. <http://www.pdvsa.com/index.php?lang=en>
- Photonics (2023). Avances recientes en sensores ópticos de hidrógeno <https://www.mdpi.com/2304-6732/10/2/122>
- PowMr. (2023). PowMr 3000W Pure Sine Wave Inverter. <https://www.amazon.com/PowMr-Inverter-Off-Grid-Controller-Lead-Acid/dp/B0B9ZMZ2YY>
- Reyes (2016). “Generación de energía eléctrica a partir de hidrogeno obtenido por medio de hidrólisis”. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18571/GENERACI%C3%93N%20DE%20ENERG%C3%8DA%20EL%C3%89CTRICA%20A%20PARTIR%20DE%20HIDR%C3%93GENO%20OBTENIDO%20POR%20MEDIO%20DE%20ELECTR%C3%93LISI%20S.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Robina A (2019). ESTUDIO DE MATERIALES APTOS PARA ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4549/Tesis%20Ariana%20Robina.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rosetta Technology Solutions (2023) Introducción a las pilas de hidrógeno. <https://rosetta-technology.com/es/aula-tecnica/notas-tecnicas/pila-combustibe-hidrogeno-como-funcionan>
- Senda1234 (2023) Diagrama de una celda de combustible de membrana de intercambio de protones.
- Tamayo y Tamayo, M. (2007). El proceso de la investigación científica; incluye glosario y manual de evaluacion de proyectos (4a. Ed.). Guadalajara: Limusa.

TECPA (2023). Tipo de pila de combustible. <https://www.tecpa.es/pila-combustible/>

Tomsovic K Zhu Y. (2001) “Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells.

Tomsovic K. Zhu Y. (2002). “Analysis and Control of Distributed Energy Resources”.

Universidad del País Vasco. (2023). Pilas de Combustible.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Pila\\_de\\_combustible](https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible)

Zhang JiuJun (2008). PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers.

## ANEXOS

## ANEXO A

Anexo A. Power cell S1

# Physical Data:

**Specification for standard stack sizes**

Max power (kW)	1	2.0	3.0	4.0	5.0
Cell Count	10	20	30	40	50
Dimensions (mm)	191x149x240	191x187x240	191x226x240	191x265x240	191x303x240
Weight (kg)	7.9	11.3	14.8	18.2	21.7

*\*PowerCells S1 stack power and size can be modified for specific needs*

**All models**

Maximum current output	200 A
$\Delta P_{\text{cathode}}$ @ nominal power	Non-condensing at inlet
$\Delta P_{\text{anode}}$ @ nominal power (H <sub>2</sub> , stoich 1.5, 15% inert)	< 1.2 Bar (g)
Maximum operating temperature	85 °C
Humidity	Non-condensing at inlet
Gas pressure	< 1.5 bar(abs)
Coolant Pressure	Gas pressure + 0.1 Bar
Ambient temperature	2 - 70 °C

ANEXO B

## Anexo B. Ballard

### Product Specifications

Rated Power [kW] <sup>1</sup>	3.8	4.8	10.6	14.4	17.3	21.2
DC voltage (at 300A) <sup>1</sup>	12.9	16.1	35.4	48.2	57.9	70.7
Mass (with no coolant) [kg]	6.2	6.8	10.2	12.1	14.3	16.6
Stack core length [mm]	92	104	174	220	255	302
Stack core width [mm]	760					
Stack core height [mm]	60					

Type	PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell stack	
Performance	Maximum current	300A
	Shock and vibration	Automotive <sup>2</sup>
Fuel Oxidant:	Fuel composition (pre-humidification)	SAE J2719
Oxidant	Oxidant composition (prehumidification)	Compressed ambient (filtered to remove particulates)
Stack Temperatures	Storage temperature <sup>3</sup>	-40 to 60° C (-40 to 140° F)
	Start-up temperature	> 2° C (> 36° F)
	Fluid inlet temperature (operating)	2 to 68° C (36 to 154° F) <sup>4</sup>

## ANEXO C

## EFOY Fuel Cell

EFOY H <sub>2</sub> Cabinet variants	H <sub>2</sub> Cabinet X2.5 1FC-6H2-P300-39U	H <sub>2</sub> Cabinet X5.0 2FC-6H2-P300-39U	H <sub>2</sub> Cabinet X2.5 1FC-12H2-P300-39U	H <sub>2</sub> Cabinet X5.0 2FC-12H2-P300-39U
Coupling for Fuel Cell(s)	1	2	1	2
Coupling for H <sub>2</sub> bottles	6	6	12	12
Dimensions (H x W x D)	approx. 2000 x 1720 x 944 mm		approx. 2000 x 2580 x 944 mm	
Weight	450 kg (empty cabinet) Up to 1.100 kg (fully equipped)		650 kg (empty cabinet) Up to 1.600 kg (fully equipped)	
Housing	Aluminium, powder coated, RC2			
Temperature range	-33 °C to +45°C			
IP class	IP 54			
<b>EFOY Hydrogen Fuel Cell 2.5</b>				
Power output <sup>2</sup>	2.500 W			
Nominal voltage	48 V			
Weight	28.5 kg			
Nominal consumption	0.06 kg/kWh			
Dimensions (L x W x H)	536 x 483 x 311 mm			
<b>Hydrogen</b>				
Content	6 x 50 l		12 x 50 l	
Pressure	300 bar			
Connection thread	W 21.80 x 1/14 LH (DIN 477 no. 1)			
Weight	480 kg (6 x 80kg)		960 kg (12 x 80kg)	
Nominal capacity	108 kWh		216 kWh	
Autonomy @ 2.5 kW	43.2 h		86.4 h	
Autonomy @ 5.0 kW	21.6 h		43.2 h	

## ANEXO D

## Electrolizador H6

MODEL	H2	H4	H6
Description	On-site hydrogen generator in an integrated, automated, site-ready enclosure Load following operation automatically adjusts output to match demand Full differential pressure, H <sub>2</sub> over O <sub>2</sub>		
Electrolyte	Proton Exchange Membrane (PEM) – caustic-free		
<b>HYDROGEN PRODUCTION</b>			
Nominal Production Rate Nm <sup>3</sup> /h @ 0°C, 1 bar SCF/h @ 70°F, 1 atm kg/24 h	2 Nm <sup>3</sup> /h 76 SCF/h 4.31 kg/24 h	4 Nm <sup>3</sup> /h 152 SCF/h 8.63 kg/24 h	6 Nm <sup>3</sup> /h 228 SCF/h 12.94 kg/24 h
Delivery Pressure – Nominal	15 barg (218 psig); Optional 30 barg (435 psig)		
Power Consumption by System per Volume of H <sub>2</sub> Gas Produced <sup>1</sup>	7.3 kWh/Nm <sup>3</sup> (19.2 kWh/100 ft <sup>3</sup> )	7.0 kWh/Nm <sup>3</sup> (18.5 kWh/100 ft <sup>3</sup> )	6.8 kWh/Nm <sup>3</sup> (17.8 kWh/100 ft <sup>3</sup> )
Purity (Concentration of Impurities)	99.9995% [H <sub>2</sub> O < 5 ppm, -65°C (-85°F) Dew Point, N <sub>2</sub> < 2 ppm, O <sub>2</sub> < 1 ppm, all others undetectable]		
Turndown Range	0 to 100% net product delivery (automatic)		
Upgradeability	Field upgradeable to a maximum of 6 Nm <sup>3</sup> /h (228 SCF/h)		N/A
<b>DI WATER REQUIREMENTS</b>			
Consumption Rate at Maximum Production	1.83 l/h (0.50 gal/h)	3.66 l/h (0.96 gal/h)	5.50 l/h (1.42 gal/h)
Temperature	5 to 50°C (41 to 122°F)		
Pressure	1.5 to 4 barg (21.8 to 58 psig)		
Input Water Quality	Required: ASTM Type II Deionized Water, < 1 μS/cm (> 1 MΩ-cm) Preferred: ASTM Type I Deionized Water, < 0.1 μS/cm (> 10 MΩ-cm)		
<b>HEAT LOAD AND COOLANT REQUIREMENTS</b>			
Coolant <sup>2</sup>	Liquid-cooled; non-freezing, non-fouling; 5 to 35°C (41 to 95°F); 25°C cooling water maximum for ambient temperatures above 40°C		
Maximum Heat Load (Cooling Requirement)	8.1 kW (27,368 BTU/h) (2.3 tons refrigeration)	16.1 kW (54,936 BTU/h) (4.6 tons refrigeration)	23.7 kW (80,868 BTU/h) (6.8 tons refrigeration)
Coolant Flow Rate	Up to 45 l/min (12 gal/min)	Up to 68 l/min (18 gal/min)	Up to 87 l/min (23 gal/min)
Pressure Drop (at Full Flow)	Up to ~3.4 barg (~50 psig)	Up to ~3.4 barg (~50 psig)	Up to ~3.4 barg (~50 psig)
Maximum Pressure	6.9 barg (100 psig)		
<b>ELECTRICAL SPECIFICATIONS</b>			
Maximum Power Required within Expected System Life	22 kVA	38 kVA	55 kVA
Electrical Requirements	380 to 415 VAC, three phase, 50 Hz or 480 VAC, three phase, 60 Hz		

## ANEXO E

## Electrolizador interface H6

Model	H2	H4	H6	
<b>INTERFACE CONNECTIONS – CONSULT INSTALLATION MANUAL FOR DETAILS</b>				
H <sub>2</sub> Product Port	1/4" compression tube fitting, SS			
H <sub>2</sub> Vent Port	1/2" FNPT, SS			
DI Water Port	1/4" FNPT, SS			
Calibration-Gas Port	1/4" FNPT, brass			
Coolant Supply and Return Ports	1" FNPT, brass			
Drain Port	1/4" FNPT, brass			
Electrical	Electrical terminals at fused disconnect inside electrical compartment			
Communications	Modbus TCP/IP, 24 VDC dry contacts			
<b>CONTROL SYSTEMS</b>				
Standard Features	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Fully automated, push button start/stop</li> <li>•Automatic fault detection and system depressurization</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>•E-stop</li> <li>•Remote start/stop</li> <li>•Remote communications</li> <li>•Optional: current command</li> </ul>	
Remote Shutdown	Hardwire input to safety PLC			
<b>PHYSICAL CHARACTERISTICS</b>				
Dimensions W x D x H	Product	180 cm x 81 cm x 191 cm (71" x 32" x 75")		
	Est. Shipping	206 cm x 104 cm x 216 cm (81" x 41" x 85") Note: Add 8 cm (3") to height for installed lifting brackets.		
Weight	Product	682 kg (1,500 lbs)	727 kg (1,600 lbs)	773 kg (1,700 lbs)
	Est. Shipping	807 kg (1,776 lbs)	858 kg (1,887 lbs)	908 kg (1,998 lbs)
IP Rating	IP66 for electrical compartment. IP43 for fluids compartment; Upgradeable to IP56.			
<b>ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS – DO NOT FREEZE</b>				
Standard Siting Location	Indoor, level ± 1°, 0 to 90% RH non-condensing, non-hazardous/non-classified environment			
Storage/Transport Temperature	5 to 60°C (41 to 140°F)			
Ambient Temperature Range	5 to 50°C (41 to 122°F)			
Altitude Range – Sea Level	2,000 m (6,562 ft)			
Room Ventilation	Proper ventilation must be provided from a non-hazardous area at a rate consistent with the cabinet ventilation rate listed below			
<b>SAFETY AND REGULATORY CONFORMITY</b>				
Maximum On-board H <sub>2</sub> Inventory at Full Production	0.040 Nm <sup>3</sup> @ 15 barg; 0.08 Nm <sup>3</sup> @ 30 barg 1.5 SCF @ 15 barg; 2.9 SCF @ 30 barg 0.0036 kg @ 15 barg; 0.0069 kg @ 30 barg			
Cabinet Ventilation with Environment	NFPA 69, chapter 8 and EN 1127-1, clause 6.2 Vent fan draws fresh air up to 28 Nm <sup>3</sup> /min (1,000 ft <sup>3</sup> /min)			
Noise dB(A) at 1 Meter	< 83			
Conformity	cTUVus (UL and CSA equivalent), CE (PED, Mach. Dir., EMC), ISO 22734-1			

ANEXO F

## Inversor PowMr

Característica	Especificación
<b>Entrada</b>	
Voltaje máximo de circuito abierto PV	500 VCC
Rango de voltaje de funcionamiento PV	120-500 VCC
Rango de voltaje MPPT	120-450 VCC
Potencia máxima de entrada PV	5500W
Máxima energía	10000VA
<b>Salida</b>	
Potencia de salida nominal	5000VA
Voltaje de salida nominal	110/120Vac (monofásico), 120V/240V (fase dividida), 208V (2/3 fase)
Rango de voltaje de salida (L-N)	100 ~ 120Vac, 120Vac predeterminado (monofásico)
Rango de voltaje de salida (L-L)	200 ~ 240 Vac, 240 Vac predeterminado (fase dividida)
Frecuencia	50 Hz/60 Hz
Fase	120 V (monofásico), 120 V/240 V (fase dividida), 208 V (2/3 fase)
Capacidad paralela	hasta 6 unidades en paralelo
<b>Batería</b>	
Voltaje de la batería	48V
Tipo de batería compatible	Plomo-ácido (sello, AGM, gel, inundadas), Litio
Controlador de carga solar MPPT	100A, eficiencia hasta 99.9%
<b>Comunicación</b>	
Protocolos	CAN, USB, RS485
<b>Protecciones</b>	
Protección de corriente de entrada fotovoltaica/limitación de potencia	Sí
Sobretensión de entrada fotovoltaica	Sí
Protección de corriente inversa nocturna fotovoltaica	Sí
Protección de sobretensión de entrada de CA	Sí
Protección contra bajo voltaje de entrada de CA	Sí
11 protecciones adicionales	Sí
<b>Paralelo</b>	
Capacidad de conexión en paralelo	Hasta 6 unidades
Potencia total máxima	30.000 kW
Conexiones paralelas compatibles	Monofásica, fase dividida, trifásica
Fase dividida	Requiere dos o más inversores
<b>Otros</b>	
Dimensiones	480 x 260 x 110 mm
Peso	15.5 kg
Certificaciones	CE, RoHS, FCC

## ANEXO G

Sensor de hidrógeno Honeywell

Especificación	Descripción
Soporte personalizado	OEM, ODM, OBM
Lugar de origen	Shandong, China
Garantía	12 meses
Marca	tpp
Modelo	TC200
Principio de detección	Combustión catalítica
Nombre del producto	Detector de gas fijo
Color	Naranja / Personalizable
Rango de medición	0-100% LEL
Sensor	Honeywell o personalizado
Tipo de alarma	Sonido + Alarma luminosa
Gas detectado	Combustible / Tóxico / Doble gas
Pantalla	LCD
Uso	Producción industrial
Método de muestreo	Difusión