



DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA CELDA DE ELECTRÓLISIS ALCALINA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE ENERGÍA SOLAR.

Mauricio José Riccioli Mendoza - Código 20441914613

Ronald David Echenique Espinosa - Código 20441917708

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ciudad, Colombia

2022

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA
CELDA DE ELECTRÓLISIS ALCALINA PARA INCREMENTAR
LA EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR
DE ENERGÍA SOLAR.

Mauricio José Riccioli Mendoza

Ronald David Echenique Espinosa

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director (a):

Ph.D.Laura Sofía Hoyos Gómez

Codirector (a):

Ph.D.Jimmy Barco Burgos

Línea de Investigación:

Energías.

Grupo de Investigación:

REM (Research in Energy and Materials).

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ciudad, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____, Cumple con

los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Contenido

	Pág.
Resumen	7
Abstract	8
Introducción.....	9
Planteamiento del problema.....	12
Justificación	14
Objetivos.....	19
1.1 Objetivo general	19
1.2 Objetivos específicos	19
Marco teorico	20
1. Tecnologías de producción de hidrogeno.....	20
1.1 Métodos de producción de hidrogeno.....	23
1.1.1 Producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos – hidrógeno gris.....	23
1.1.2 Producción de hidrógeno a partir de energías renovables - hidrógeno verde	26
1.2 Aplicaciones para el aprovechamiento del hidrógeno como recurso energético	36
1.3 Casos de estudio de aplicaciones del hidrógeno como un facilitador de la transición energética en otros países.	37
1.4 Oportunidades de aplicación del hidrógeno en Colombia.....	38
1.4.1 Trayectoria legislativa del hidrógeno en Colombia.....	38
1.4.2 Nichos de oportunidad para el hidrógeno en Colombia	41
Metodología.....	42
2. Construcción de la celda de electrolisis alcalina y ensamble del sistema de generación de hidrogeno	42

2.1	Construcción de la celda de electrolisis alcalina.....	42
2.2	Emsanble del sistema de generacion de hidrogeno	48
3.	Resultados y discusiones.....	53
3.1	Pruebas realizadas a la celda construida	53
3.2	Resultados obtenidos de las pruebas	55
3.3	Discusión de los resultados obtenidos.....	58
	Conclusiones.....	63
	Anexos.....	65
	Referencias Bibliográficas	67

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Celda de electrólisis alcalina.....	3
Figura 2. Sistema de generación de hidrógeno.....	18
Figura 3. Clasificación de los tipos de hidrógen.....	21
Figura 4. Enfoque de los sistemas de energía del hidrogeno.....	22
Figura 5. Estructura mundial de producción de hidrogeno	24
Figura 6. Electrodo	43
Figura 7. Lijado del electrodo.....	44
Figura 8. Sellos de neopreno	45
Figura 9. Membrana Techme-Zifron.....	45
Figura 10. Instalacion de pernos y capa de silicona.....	46
Figura 11. Instalación de sellos de neopreno	47
Figura 12. Ensamble total de celda de electrolisis	48
Figura 13. sistema de suministro de energía	50
Figura 14. Instalación de paneles solares.....	51
Figura 15. Batería de descarga profunda	51
Figura 16. Sistema de recolección de agentes (H ₂ O, H ₂ y O).....	52
Figura 17. Sistema de medición de gas.....	52
Figura 18. Botella de almacenamiento de gas	53

Figura 19. Caudal celda 1mm de separación entre electrodos (Nm^3/h)	56
Figura 20. Eficiencia celda 1mm de separación entre electrodos (W)	57
Figura 21. Eficiencia sistema 1mm de separación entre electrodos (W)	58
Figura 22. Comparativa configuración de celdas (caudal Nm^3/h vs. Corriente).....	59
Figura 23. Comparativa configuración de celdas (eficiencia vs. Corriente)	60
Figura 24. Comparativa configuración de celdas (eficiencia sistema vs. Corriente)..	62

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Comparación valores pruebas experimentales de celdas electrolisis alcalinas.....	16
Tabla 2. Características del panel fotovoltaico	31
Tabla 3. Promedio radiación solar diaria Bogotá (Wh/m^2 por dia)	31
Tabla 4. Consumo diario de energía	33
Tabla 5. Características del modulador de ancho de pulso	34
Tabla 6. Evaluación celda de configuración de separación entre electrodos de 1 mm	64

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Amperio	I	Intensidad de corriente eléctrica
mm	Milímetro	mm	Unidad de longitud
C	Centígrado	C	Unidad de temperatura
J	Julio	J	Unidad de energía y trabajo.

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
K	Kelvin	K	Unidad de temperatura
L	Litro	L	Unidad de volumen
V	Voltio	V	Unidad de tensión eléctrica
W	Watts	W	Unidad de potencia eléctrica

Subíndices

Subíndice Término

HHV_{H_2}	High heating value (energía calorífica del hidrógeno)
CO_2	Dioxido de carbono
CH_4	Metano
H_2	Hidrogeno
H_2O	Agua
N_2	Dinitrogeno
O_2	Oxigeno

Superíndices

Superíndice Término

Nm^3/h	Metros cubicos por hora normalizados
m^3/h	Metros cubicos por hora

Abreviaturas

Abreviatura Término

3S	Source - System - Service
----	---------------------------

Abreviatura Término

AEL	Electrolisis alcalina
BID	Banco interamericano de desarrollo
BEV	Vehículo eléctrico a batería
CEA	Celdas de electrolisis alcalina
CCMIP	Celdas de combustible de membrana de intercambio de protón
CuCl	Cobre-Cloro
CIURE	Comisión intersectorial para el uso racional y eficiente de la energía
CEOS	Celdas electrolizadoras de oxido solido
CO	Monóxido de carbono
FCEV	Vehículo eléctrico de pila de combustible
GEI	Gases de efecto invernadero
IEA	Agencia internacional de energía
KOH	Dióxido de potasio
MME	Ministerio de minas y energía
NDC	Nivel nacional de Colombia
Ni	Niquel
NIP	National innvation program
PEM	Electrolisis de membrana de intercambio de protones
Pd	Paladio
PIB	Producto interno bruto
Pt	Platino
PWM	Pulse width modulator
PSA	Adsorción con oscilación de presión
Rh	Rodio
Ru	Rutenio
SAIC	Shanghái Automotive Industry Corporation
SMR	Reformado de metano con vapor
URE	Uso racional y eficiente de la energía

Agradecimientos

Agradecerles primeramente Dios y a nuestros familiares, por brindarnos su apoyo incondicional en cada uno de los momentos donde necesitamos de ustedes, han sido la motivación y una pieza fundamental para obtener este grado.

Especial agradecimiento a nuestros directores de proyecto, la directora Ing. Laura Hoyos Gómez y codirector PhD. Jimmy Barco Burgos quienes nos dieron lo mejor de si y nos ayudaron a poder cumplir con este gran objetivo. Sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

A todos aquellos que hicieron parte de este viaje académico muchas gracias.

Resumen

El objetivo de este proyecto consiste en la construcción de una celda de electrólisis alcalina, con solución electrolítica al 40 % de KOH y alimentación de energía por medio de un panel solar fotovoltaico, que pueda incrementar el volumen de hidrógeno generado por las celdas estudiadas en el artículo base (*“Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen”*). Buscando el incremento en la eficiencia del sistema y en la producción de un mayor volumen de hidrógeno al generado por la celda con configuración de 3 mm. Para lograrlo se redujo la distancia entre los electrodos de la celda de 3 mm a 1 mm y se utilizaron mejores materiales para su construcción. Asimismo, se ejecutaron pruebas experimentales y los resultados obtenidos se compararon con la celda estudiada en el artículo base, validando experimentalmente un incremento del 36.5 % en la producción de hidrógeno.

Palabras clave:

- Hidrogeno
- Construcción de celda
- Energía solar
- Electrolisis alcalina

Abstract

The main goal of this project is to manufacture a dry electrolysis cell with a 40 % KOH electrolyte solution powered by a solar photovoltaic cell. The article “Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen” was the theoretical base of this project. One of the expected results of the undertaken experiments is to increase the hydrogen volume against the previously analyzed cell reported in the article base. To improve the results, we reduced the distance between the cell electrodes from 3 mm to 1 mm, and we used better materials for its construction. Furthermore, experimental tests were performed, and the results obtained were compared with the base article results, validating an increase of 36.5 % in hydrogen generation experimentally.

Keywords:

- Hydrogen
- Cell construction
- Alkaline electrolysis
- Solar energy

Introducción

El planeta tierra está enfrentando cambios debido al aumento de la temperatura acelerado por la contaminación y la emisión de gases de efecto invernadero. Esta situación ha hecho que muchos países busquen alternativas para enfrentar este problema [12]. Dentro de esas alternativas se encuentra la sustitución de energéticos, esta transición busca pasar de un uso masivo de fuentes fósiles a unas de origen renovable, con el objetivo de tener sistemas energéticos menos contaminantes, aprovechar los recursos localmente disponibles y a su vez incrementar la autarquía energética de cada país [1] [2].

Haciendo una separación por sectores de bienes y servicios, el sector industrial y el de transporte son los que más generan contaminación en la actualidad [11], y a medida que crece la demanda de servicios de la población, el problema de contaminación y agotamiento de algunos energéticos también lo hace, debido al uso de combustibles fósiles para el funcionamiento de la mayor parte de las industrias. Diferentes países están implementando políticas para mitigar el impacto del cambio climático en las próximas décadas, y gradualmente reducir la dependencia de su economía en las energías fósiles, impulsando el desarrollo de otras formas de energía limpias. Las tecnologías para aprovechar las energías renovables y los combustibles alternativos llevan tiempo siendo desarrolladas. En este sentido, hay varias investigaciones que han buscado el desarrollo de nuevos sistemas de energía sustentables, que permitan a las diferentes industrias hacer una transición en el uso de energías fósiles a unas renovables, más eficientes y menos contaminantes [2][3][9].

Entre algunas políticas energéticas que han dado impulso al desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de energía renovables, se destaca el protocolo de Kyoto de 2007 y el acuerdo de París de 2015. Este último fijó el objetivo a largo plazo de mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2 °C sobre los niveles preindustriales, y limitar el aumento a 1,5 °C, lo que reducirá considerablemente los riesgos y el impacto del cambio climático [16]. Los 189 países hoy pertenecientes al acuerdo de París [15] pactaron en su compromiso para hacer la transición hacia un mundo más sustentable con menor uso de energías fósiles. Para alcanzar dicho objetivo, estos países estipularon una reducción de sus emisiones de gases efecto

invernadero. Una de las alternativas contempladas para lograr el objetivo planteado es la transición energética, es decir, pasar de un uso masivo de combustibles fósiles hacia un uso masivo de energías renovables menos contaminantes.

Considerando al desarrollo tecnológico, la comunidad científica durante años ha llevado a cabo distintas investigaciones sobre los beneficios que tiene sobre el ambiente la utilización de las energías renovables sobre los combustibles fósiles. En la actualidad la generación de energía por medio de combustibles fósiles es más económica que la generación de energía usando fuentes renovables. No obstante, la reducción de los costos a nivel competitivo ha facilitado la incorporación de estas tecnologías en las matrices energéticas y al mismo tiempo impulsa la transición energética. Respecto al hidrógeno, que es considerado una energía renovable, éste lentamente ha ganado relevancia en el sector industrial al punto que ha sido considerado como el combustible de la próxima generación, debido a sus bajas emisiones contaminantes.

Entre los métodos comúnmente utilizados para la producción de hidrógeno entre las fuentes no renovables tenemos i) reformados, ii) descomposición térmica, iii) pirólisis, iv) gasificación, v) oxidación parcial y vi) electrólisis a alta temperatura, vii) descarbonización; mientras que en las fuentes renovables encontramos métodos como i) solar, ii) eólica, iii) biomasa, iv) electrólisis, v) descarbonización de combustibles fósiles, vi) termólisis, vii) pirólisis, viii) gasificación y ix) fermentación [4][9][18].

De los métodos mencionados para la producción de hidrógeno de manera renovable, hay un creciente interés en la electrólisis. Esto ha llevado al desarrollo de varios tipos de electrolizadores. Entre los tipos más comunes de electrolizadores tenemos: i) celdas electrolizadoras de óxido sólido, ii) celdas de membranas de intercambio de protones y iii) celdas de electrólisis alcalinas [4] [5]. En el artículo base (*“Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen”*) se realizó el diseño y caracterización de una celda de electrólisis alcalina para producción de hidrógeno a presión atmosférica [10]. En ese estudio se evaluó el comportamiento de la celda cuando se aplicó diferentes valores de corriente. La corriente provino de un sistema de paneles solares con valor máximo de corriente de 30 A y con una tensión de 12 V. Los autores encontraron que la distancia entre electrodos influye en la eficiencia en la

producción de hidrogeno. Ellos encontraron de forma experimental una máxima eficiencia del sistema de generación de hidrógeno de 4,6 %, la eficiencia de la celda de electrólisis alcalina fue de 31 % generando un flujo máximo de hidrógeno de $0,0260 \text{ Nm}^3/\text{h}$ cuando la separación entre electrodos es de 3 mm [10].

Durante el experimento realizado en el artículo base, los autores evidenciaron el efecto Joule-Thomson sobre el ánodo y cátodo; este fenómeno fue detectado midiendo las diferencias de temperatura entre los electrodos. Además, ellos observaron que había una mayor temperatura en las superficies rugosas de los electrodos, que es donde se forman burbujas de gas, donde se realiza mayor reacción de oxidación y reducción [10]. El crecimiento y desplazamiento de las burbujas estará sujeto al balance de fuerzas en el área de contacto entre la superficie del electrodo, el electrolito y las burbujas. Teniendo estos tres elementos y por efecto de la corriente aplicada a la celda de electrólisis alcalina, se genera alta formación de gas y desprendimiento de las burbujas desde la parte baja de los electrodos, junto con una mayor convección natural del electrolito [10].

En este proyecto pudimos observar el efecto que tiene sobre el crecimiento y desplazamiento de las burbujas, el balance de fuerzas en el área de contacto entre la superficie del electrodo, el electrolito y las burbujas, cuando se reduce la distancia entre electrodos de 3 mm a 1 mm. Registrando la eficiencia del sistema de generación de hidrógeno y la eficiencia de la celda de electrólisis alcalina con configuración de 1 mm. También cambiamos la membrana de separación de poliéster por una membrana Techme-Zifron, mejorando la eficiencia de separación de los gases generados en la celda (oxígeno e hidrógeno).

Al finalizar se esperaba incrementar la eficiencia del sistema de generación de hidrogeno y la eficiencia de la celda de electrólisis alcalina en al menos un 2%, mejorando así el valor antes registrado de 4.6% de eficiencia del sistema de generación de hidrogeno y el 31% de eficiencia de la celda de electrólisis alcalina de la configuración de 3 mm de separación entre electrodos estudiada en el artículo base (“Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen”).

Planteamiento del problema

El cambio climático ha motivado a la comunidad científica a desarrollar investigaciones que ayuden a mitigar los daños a la atmósfera terrestre. Muchos estudios revelan que el sector industrial es uno de los mayores contaminantes, junto con la creciente población mundial que demanda cada vez mayores servicios y recursos energéticos. La industria del transporte y el sector automovilístico son una fuente importante de contaminación, porque emplean para su operación combustibles fósiles [11], con el desarrollo de este proyecto buscamos que esta tecnología pueda ser implementada por la industria como combustible único o complementario en motores de combustión interna en el futuro.

En frente tendremos algunos retos a superar para un mayor uso de esta tecnología en la industria, como lo son incrementar la confiabilidad y la durabilidad de la celda de electrólisis alcalina para producción de hidrógeno, así como también la reducción de costos en su producción y mantenimiento. Ya que hoy en día sigue siendo más rentable el uso de energías fósiles.

En décadas pasadas se han venido desarrollado nuevas tecnologías para la producción de combustibles alternativos, que permitan hacer una transición de combustibles fósiles a los alternativos por ser menos contaminantes, también porque desde la firma del acuerdo de París su producción está siendo apoyada por los estados pertenecientes al acuerdo.

Combustibles alternativos como el hidrógeno han tomado importancia al ser considerado por la industria como el combustible del futuro. La producción de hidrógeno mediante celdas de electrólisis alcalinas alimentada por fuentes de energía renovables como la solar es una de las tecnologías es una de las más económicas de la industria [8].

El presente proyecto mostrará el diseño y fabricación de una celda de electrólisis alcalina para la generación de hidrógeno con alimentación de energía desde un panel fotovoltaico, para aprovechar una de las fuentes de energía renovable más abundantes en el Caribe colombiano, acompañado de un trabajo experimental para determinar condiciones de operación que permitan incrementar la eficiencia de la celda de electrólisis alcalina, donde probaremos distintas

condiciones de operación para el cálculo de rendimientos (flujo máximo de hidrógeno y máxima eficiencia).

También se reducirá la distancia entre los electrodos de la celda a 1 mm, modificando las dimensiones dadas en el artículo base (“Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen”)[10]. Los resultados obtenidos se comparan con otras pruebas experimentales, como las que fueron tomadas del artículo base, donde podemos observar el rendimiento de una celda de electrólisis alcalina a una corriente de 30 A/12 V, y que generó un flujo máximo de hidrógeno de $0.0260 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (*metros cúbicos por hora normalizado*), con una distancia de 3 mm entre los electrodos de la celda.

Una celda de electrólisis alcalina es básicamente un conjunto de celdas electroquímicas que descomponen las moléculas del agua líquida en hidrógeno y oxígeno. Las celdas están compuestas por: (i) un electrolito o conductor, (ii) un ánodo y un cátodo donde ocurre la reacción, (iii) sistema de suministro de energía y sistemas de suministro y recolección de agentes (H_2O , H_2 y O). Para la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, se induce una corriente a una reacción química no espontánea dentro de la celda y que por medio de la electrólisis del agua se genera la reacción de interés [10].

Los tipos de celdas alcalinas más comunes que encontramos en el mercado son las celdas electrolizadoras de óxido sólido (CEOS), las celdas de combustible membrana de intercambio de protón (CCMIP) y las celdas de electrólisis alcalinas (CEA). Los porcentajes de rendimiento en las celdas CEOS y CCMIP son aproximadamente un 90% y de un 80% respectivamente, estos porcentajes son considerablemente más altos que los de las celdas CEA, cuyo porcentaje de rendimiento está entre un 59% y un 70%. Además de la ventaja de mayor eficiencia, las celdas CEOS y CCMIP poseen un consumo de energía más bajo, y también una mejor estabilidad química y térmica. Pero presentan desventajas como una menor resistencia a las sustancias corrosivas y son tecnologías que requieren un mayor presupuesto que las celdas CEA, debido a los altos costos en los materiales para su fabricación [10].

Justificacion

La producción de hidrógeno usando fuentes de energía renovable tiene un papel importante en la transformación sustentable de los sistemas de movilidad en el futuro próximo [10], su uso como combustible alternativo en la optimización de motores a combustión interna muestran los pasos de que la industria del transporte está dando hacia una nueva era de bajas emisiones contaminantes.

Métodos de producción de hidrógeno como la electrólisis del agua y los electrolizadores de agua alcalina pueden tener una baja corriente y una baja densidad de energía, pero tienen un costo inicial bajo por kilovatio (kW), lo que convierte a esta tecnología en una de las más económicas de la industria [17], con un gran potencial de desarrollo disponible.

Buscando promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero el Gobierno Colombiano expidió la ley 1750 de 2014 [6], sin embargo, la generación de energía eléctrica por cualquier otro medio convencional sigue teniendo un costo más bajo que la generación de energías renovables. No obstante, la expedición de esta ley le da a la industria colombiana una gran oportunidad para apoyar proyectos donde la generación de energía renovable pueda llegar a ser en un principio tan rentable como la generación de energía convencional debido a los incentivos de impuestos más bajos que el gobierno otorga aquellos que tengan interés en desarrollar la implementación de energías renovables [3].

Podemos resaltar dentro de las finalidades de la ley 1750 de 2014 está el estimular la inversión, la investigación y el desarrollo para la producción y utilización de energía a partir de fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, mediante el establecimiento de incentivos tributarios, arancelarios o contables y demás mecanismos que estimulen desarrollo de tales fuentes en Colombia [6].

En Colombia tenemos regiones con una posición geográfica favorable para el desarrollo de energías renovables como lo son la energía solar, eólica, de los mares, entre otras. Ya que por estar localizada dentro de los trópicos recibe gran cantidad de irradiancia solar a lo largo del año sin variaciones considerables; por otra parte, Colombia tiene amplias costas, lo que facilita el aprovechamiento de las energías de los mares como las mareomotriz, undimotriz, de salinidad y oceánica térmica que tienen gran potencial en las zonas tropicales.

En este proyecto trabajaremos con celdas de electrólisis alcalina secas, buscando con el uso de esta tecnología la generación de hidrógeno por medio de electrólisis del agua, que es una de las tecnologías más económicas existentes [8], estudio que se suma a aquellos que buscan desarrollar tecnologías para hacer más rentable la generación de energía renovable. En Colombia debemos trabajar en su generación para llegar a conocer los costos, eficiencia, sostenibilidad y visualizar su posible demanda en el país.

Llevaremos a cabo el diseño y fabricación de una celda de electrólisis alcalina para la generación de hidrógeno con alimentación de energía desde un panel fotovoltaico, acompañado de un trabajo experimental donde probaremos distintas condiciones de operación para el cálculo de rendimientos (flujo máximo de hidrógeno y máxima eficiencia).

Se reducirá la distancia entre los electrodos de la celda de 3 mm a 1mm, modificando las dimensiones dadas en el artículo base (“Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen” [10]), para determinar la eficiencia de la celda de electrólisis alcalina y el sistema de generación de hidrogeno.

En la Tabla 1 se comparan las pruebas experimentales obtenidas entre los tipos más comunes de electrolizadores, donde son dadas las especificaciones de cada electrolizador.

Tabla 1.

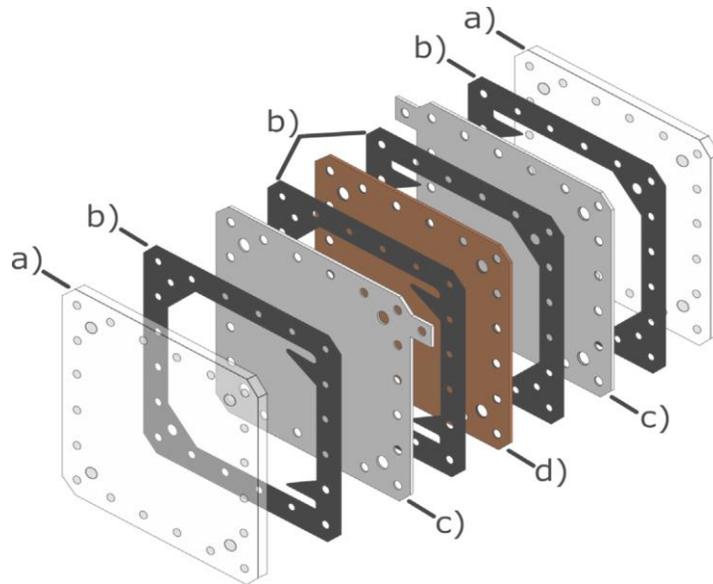
Comparación valores pruebas experimentales de celdas electrolisis alcalinas

Especificación	Unidades	Celdas alcalinas	Celdas de membranas de intercambio de protones	Electrolizadores de oxido solido
Estado de la tecnología	-----	Ampliamente comercializada	Comercializada	Investigación y desarrollo
Temperatura de la celda	C°	60 – 80	50 – 80	900 – 1000
presión de la celda	Bar	< 30	< 30	< 30
Densidad de corriente	$A\ cm^{-2}$	< 0,45	1,0 – 2,0	0,3 – 1,0
Voltaje de la celda	V	1,8 – 2,2	1,0 – 2,2	0,98 – 1,3
Eficiencia de voltaje	%	59 – 70	67 – 82	81 – 86
Carga de energía específica del sistema	$kW\ h\ Nm^{-3}$	4,2 – 4,8	4,4 – 5,0	2,5 – 3,5
Área de carga parcial específica de la celda	%	10 – 40	0 – 10	-----
Área de la celda	m^2	3,0 – 3,6	< 0,13	< 0,06
Producción de hidrogeno de la celda	$Nm^3\ h^{-1}$ kh	< 1400 55 – 120	< 400 60 – 100	< 10 8 – 20
Tiempo de vida de la celda	Año(s)	20 – 30	10 – 20	-----
Tiempo de vida del sistema	%	> 99,8	> 99,99	-----
Pureza del hidrogeno	Min	15	< 15	> 60
Tiempo de arranque en frio	$\$ kW^{-1}$	900 – 1700	1500 – 2300	> 2200
Costo de inversión				

Fuente: Tomada de [7][10][17]

En la figura 1 podemos observar las dimensiones de la celda alcalina utilizada en el trabajo base. Esta celda está compuesta por: a) dos láminas de acrílico translucido de 200 x 200 x 8 mm, b) cuatro sellos de neopreno de 200 x 200 x 1 mm, c) dos láminas de acero inoxidable 316 L de 200 x 200 x 1.9 mm (anodo y catodo) modificadas por un proceso de abrasión para incrementar el área de superficie del electrodo y d) una membrana Techme - Zifron de 200 x 200 x 1 mm [10].

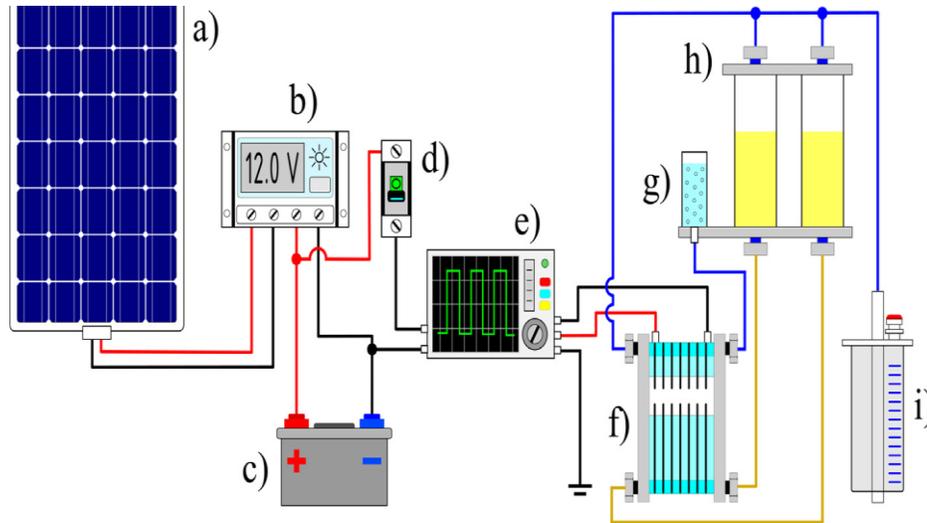
Figura 1. Celda de electrólisis alcalina



Fuente: Tomada de [10]

La figura 2 muestra el diagrama representativo del sistema de generación de hidrógeno que utilizaremos para la realización de las pruebas experimentales. Está conformado por los siguientes componentes: a) panel solar policristalino, b) regulador de carga, c) batería de descarga profunda, d) interruptor bipolar de riel, e) modulador de ancho de pulso de corriente continua, f) celda de electrólisis alcalina, g) receptor de oxígeno, h) contenedores de electrolito KOH, i) tanque colector de hidrógeno [10].

Figura 2. Sistema de generación de hidrógeno.



Fuente: Tomado de [10].

Para la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, se induce una corriente a una reacción química no espontánea dentro de la celda y que por medio de la electrólisis del agua se genera la reacción de interés [10].

Decidimos tomar este proyecto porque creemos que, con el estudio de las condiciones de operación, fabricación y los datos experimentales recolectados de las celdas CEA, al final de este proyecto podemos contribuir con más información que ayude en el desarrollo de las energías renovables y en la búsqueda de hacer esta tecnología igual de rentable a la generación de energía con combustibles fósiles en un futuro próximo, y avanzar en su desarrollo para que pueda ser implementada por la industria como combustible único o complementario en motores de combustión interna.

Objetivos

1.1 Objetivo general

Construir una celda de electrólisis alcalina cuya separación entre electrodos sea menor a las que se tomaron en el estudio base de 17 mm, 11 mm y 3mm, para producir hidrógeno a partir de energía solar, reduciendo la pérdida óhmica, incrementando la generación de hidrógeno y mejorando la eficiencia del electrolizador frente a diseños previos en al menos 2 %.

1.2 Objetivos específicos

- i. Diseñar una celda de electrólisis alcalina con espacio entre electrodos y membranas de separación de 1 mm, que reduzca la pérdida óhmica, e incremente su eficiencia en al menos 2 % con respecto a la eficiencia de la celda construida en el estudio base “*Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen production at atmospheric pressure*” [10].
- ii. Construir una celda de electrólisis alcalina para generación de hidrógeno, usando acero inoxidable como electrodos y KOH como electrolito, con la finalidad de incrementar su resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica.
- iii. Evaluar el rendimiento del diseño propuesto mediante un banco de pruebas bajo diferentes medidas de corriente (5 A, 10 A, 15 A, 20 A, 25 A, 30 A, 35 A, 40 A y 45 A), y métricas como el porcentaje de eficiencia del electrolizador, la rata del flujo de hidrógeno generado (Nm^3/h), y el porcentaje de eficiencia del sistema, aplicando las ecuaciones $\eta_{celda\ electrolisis} = \frac{Q*(HHV_{H_2})}{V*I}$ y $\eta_{sistema} = (eficiencia\ panel\ PV) * (\eta_{celda\ electrolisis})$.

Marco teorico

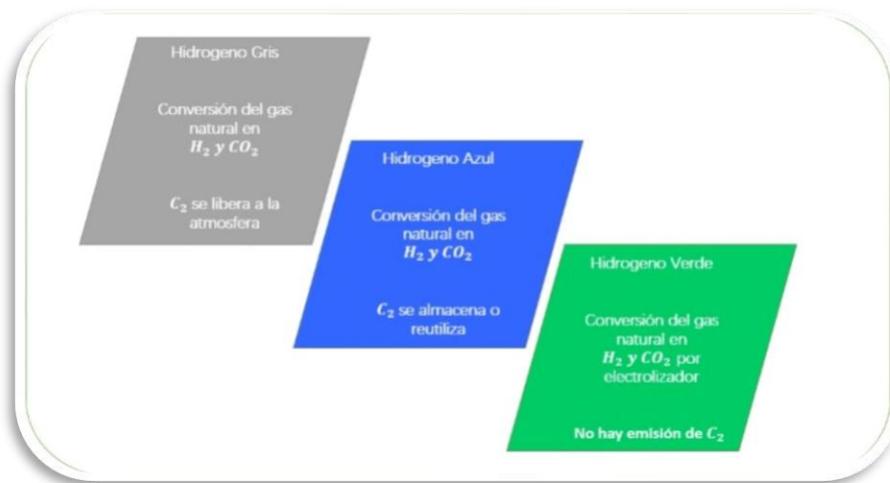
1. Tecnologías de producción de hidrogeno

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA) cerca del 80% de los recursos energéticos que se consumen en el planeta provienen de los llamados combustibles fósiles generando un impacto ambiental considerable [14]. Por otro lado, los recursos fósiles están concentrados en algunas regiones del mundo, lo que hace que dichos territorios tengan una influencia económica sobre aquellas que no poseen recursos fósiles para abastecer su consumo. La concentración de los recursos fósiles en algunas regiones del planeta ha hecho que estos recursos tengan un precio que esté ligado a asuntos políticos; esta situación ha originado diversas confrontaciones entre los países poseedores de los recursos fósiles y los consumidores derivado en altos precio de los recursos fósiles y en algunas ocasiones en conflictos bélicos [14]. En consecuencia, los países consumidores de combustibles fósiles, principalmente localizados en la Unión Europea, han promulgado políticas energéticas que conducen hacia una transición energética, con el objetivo de poder utilizar los recursos renovables localmente disponibles e incrementar su autarquía energética. Por otro lado, las consecuencias de la quema de combustibles fósiles sobre el ambiente ha sido otra de las motivaciones para migrar desde los combustibles fósiles hacia los recursos renovables.

En la actualidad, la demanda de recursos energéticos, así como la continua búsqueda de mitigar las emisiones de GEI han impulsado la realización de estudios en busca de nuevas fuentes de energía que aporten al crecimiento y sostenibilidad. La producción de hidrógeno es un componente clave para el futuro de los sistemas energéticos y su posicionamiento en los distintos sectores de consumo, tales como los medios de transporte; asimismo, para la transición energética y la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero - GEI. No obstante, el hidrógeno no se encuentra en su forma elemental, se encuentra combinado químicamente con otros elementos, por eso es necesario llevar a cabo algunos procesos químicos para su extracción, en la actualidad la principal dificultad de producción de hidrogeno es la fuente o materia prima desde la cual se obtiene, cerca del 96 % proviene de fuentes no renovables como lo son el gas natural, petróleo y carbón, y un 4% proviene de fuentes renovables y limpias [14].

Cabe anotar que Colombia destaca en el mundo por sus reservas de carbón y su disponibilidad de recursos hídricos, biomasa y otras fuentes renovables de energía, lo que permitiría la producción de hidrógeno con diversas fuentes. La Figura 1 muestra los tipos de hidrógeno clasificados por su fuente de producción, el hidrógeno gris es el que proviene de recursos fósiles el hidrógeno y contiene altas emisiones de CO_2 , el hidrógeno azul se produce a partir de recursos fósiles y contiene bajas emisiones de CO_2 y el hidrógeno verde es el que se produce utilizando energía renovables biomasa, electrolisis y no genera emisiones de CO_2 para la reacción química. La Figura 1, clasificación de los tipos de hidrogeno.

Figura 3. Clasificación de los tipos de hidrógen



Fuente: Fuente propia

Como se ha mencionado a la fecha de hoy, la producción de hidrogeno en mayor escala se da utilizando recursos fósiles [9]. Por tal razón se está implementando para la mitigación y control de GEI (gases de efecto invernadero) la utilización de tecnologías limpias para la producción de hidrogeno, 3S (source - system - service) es un concepto propuesto por Dincer y Acar [9].

Siguiendo este concepto, estos tres criterios son relevantes para garantizar que la producción de hidrogeno sea limpia:

- a. Source (fuente): es fundamental para la obtención de hidrogeno de forma limpia, la selección de sistemas energéticos con bajos valores de emisión, adicionalmente deben ser rentables, seguros, confiables y de fácil acceso.
- b. System (sistema): la selección de los sistemas de producción de hidrogeno deben ser optimizados, que el efecto al medio ambiente sea benigno y debe tener la capacidad de operar de forma integrada con otros sistemas y así aumentar su eficiencia.
- c. Service (servicio): la utilización del hidrogeno producido debe ser confiable, eficiente, practico y limpio.

Figura 4. Enfoque de los sistemas de energía del hidrogeno.



Fuente: Tomado de [17]

1.1 Métodos de producción de hidrogeno

La producción de hidrógeno se puede llevar a cabo a partir de distintas materias primas, distintas fuentes de energía y por distintos procesos, donde la finalidad es la separación del hidrógeno de otros químicos como el carbono y oxígeno.

Los tipos de energía utilizados para la producción de hidrógeno son:

1. Combustibles fósiles - Hidrógeno gris
2. Energías renovables - Hidrógeno verde

Tradicionalmente el hidrógeno es extraído de los combustibles fósiles (Hidrocarburos) por medio de procesos químicos. Así mismo, puede ser obtenido del agua por medio de producción biológica o usando electricidad (electrolisis del agua), químico (reducción química) o calor (termólisis); estos procesos son poco implementados y son materia de estudio, pero por sus bajas emisiones en CO_2 que permiten reducir la contaminación y el efecto invernadero, se hace necesario acelerar la producción masiva de hidrógeno y establecer la denominada economía de hidrógeno.

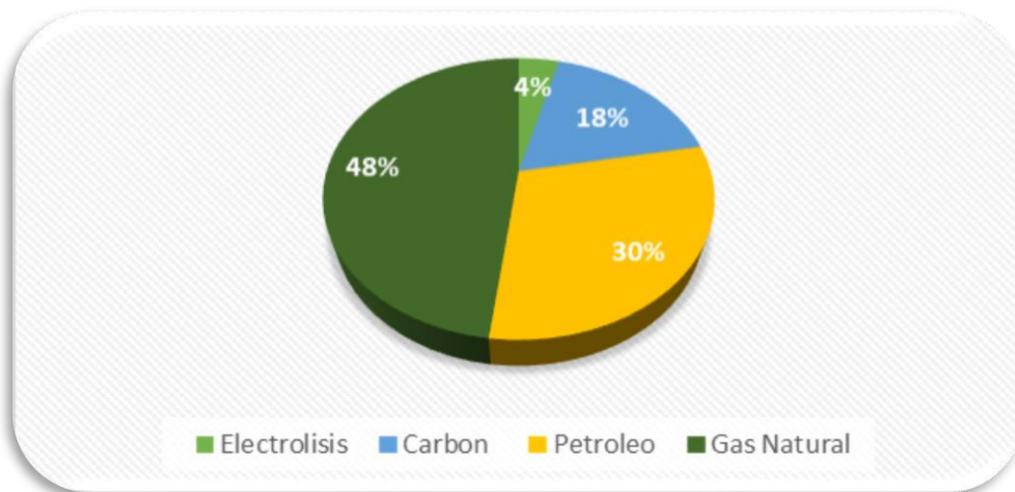
A continuación, se explicará brevemente el proceso de producción de hidrógeno a partir de la clasificación dada por el tipo de energía utilizada.

1.1.1 Producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos – hidrógeno gris

El gas natural con un 48% y el petróleo con un 30% presentan el mayor porcentaje de los energéticos usados para la producción mundial de hidrógeno, así mismo se encuentra el carbón con un 18% y la electrolisis con un 4%. ver Figura 3; no obstante, toda la producción de hidrógeno generada a partir de procesos petrolíferos es consumida internamente por las refinerías en sus distintos procesos sea como reactivo para la eliminación de azufre de las gasolinas, o también para la producción de diésel en plantas con procesos de hidrotatamiento, como; hidrosulfuración, hidroisomerización, desaromatización, hidrocraqueo [14].

Las ventajas inherentes de los combustibles fósiles, su costo, almacenamiento, disponibilidad y distribución, desempeñan un papel importante en la producción de hidrógeno [14].

Figura 5. Estructura mundial de producción de hidrogeno



Fuente: Tomado de [14]

A continuación, se describen algunos de los métodos utilizados para la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles.

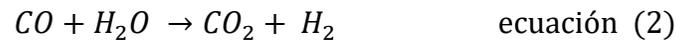
- **Reformado de Metano con vapor (SMR)**

En el reformado por vapor se utiliza como materia prima gas natural o un hidrocarburo liviano, el cual sometido a agua a alta presión y agregando calor con una fuente externa permite producir: hidrógeno, CO y CO_2 . Este método es utilizado ampliamente para la producción de hidrógeno con un rango de eficiencia entre el 65 % y 75 %, la reacción que se forma es:



Esta reacción es llevada a cabo a una temperatura de 870 °C sobre un catalizador de níquel, empacado en los tubos de un horno de reformación, al finalizar la reformación el CO generado

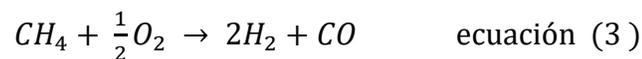
reacciona con el vapor de agua para formar hidrógeno adicional, en la reacción de desplazamiento con agua:



Luego de esta reacción se obtiene una mezcla formada por hidrógeno y CO_2 principalmente, el dióxido de carbono puede eliminarse por medio de dos procesos, sea por absorción selectiva en una solución de aminas, o también puede hacerse utilizando una unidad de PSA (adsorción con oscilación de presión) de esta forma se consigue eliminar las impurezas de la corriente de hidrógeno (CO_2, CO, CH_4, N_2) [16], la absorción con oscilación de presión es generalmente la primera opción para las plantas que utilizan este proceso de reformación con vapor de agua, esto debido a la facilidad de integración en la planta de su costo y combinación de alta pureza [16].

▪ Oxidación parcial

Consiste en someter el hidrocarburo a una concentración limitada de oxígeno, para evitar que se produzcan los productos de la oxidación completa como lo son H_2O y CO_2 , debido a esta limitación se obtiene H, N y CO, este es un proceso exotérmico, que tiene la siguiente reacción:



En este proceso se puede hacer uso elevado de la temperatura, dado que no se cuenta con limitación por los materiales de los tubos del catalizador, esto aporta a la reducción del metano no convertido [16].

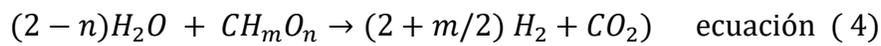
Existen dos tipos de oxidaciones parciales:

- Térmica: esta se lleva a cabo con temperaturas que superan los 1.200 °C trabajando con presiones entre 50-70 atm, es utilizada en cuando la materia prima es hidrocarburos con alto contenido de azufre.
- Catalítica: en este tipo de reacción se usan catalizadores como Ni, Pt, Rh, Ru, Pd que permiten reducir la temperatura de la reacción por debajo de los 900 °C. A diferencia de la oxidación térmica, este tipo de reacción debe ser utilizada cuando la materia prima es hidrocarburos con bajo contenido de azufre, para mitigar el impacto o desgaste en los

catalizadores por la contaminación que ocasiona el azufre en ellos; esta limitación hace que aumente el costo de la utilización de este tipo de método.

Producción de Hidrógeno a partir de Carbón

El carbón es considerado la materia prima más económica para la producción de hidrógeno en plantas de gran escala, esto por las reservas mundiales de carbón existentes a nivel mundial. En el proceso de gasificación de carbón (CH_mO_n), en un reactor de alta temperatura y presión este se oxida parcialmente cocen vapor de agua y O_2 , de esta reacción se produce gas de síntesis principalmente (H_2 , CO , mezclado con vapor y CO_2):



Es importante anotar que este es el método que genera mayores emisiones de CO_2 en comparación con otras tecnologías de producción de hidrógeno disponibles [14]. En la actualidad, la generación de hidrógeno por medio del método de gasificación del carbón es más costoso que la generación de hidrógeno a partir del reformado por vapor de gas natural, a pesar de que los costos de la materia prima son menores [14]. El hidrógeno producido a partir del carbón es utilizado para la obtención de otros elementos como lo son metanol, metano, amoníaco y productos de Fischer-Tropsch [14].

1.1.2 Producción de hidrógeno a partir de energías renovables - hidrógeno verde

A continuación, en esta sección se presentarán algunos de los métodos utilizados para producir hidrógeno a partir del uso de fuentes de energía renovable:

- **Gasificación termoquímica de la biomasa**

La biomasa es un recurso renovable que se encuentra disponible de forma abundante y distribuido geográficamente de manera uniforme, comparándolo con los recursos fósiles. Es considerada una de las fuentes más destacadas para la producción de biometano e hidrógeno [14]. La biomasa tiene un bajo contenido de hidrógeno con contenidos de humedad relativas entre un 10 % y 70%, la conversión termoquímica y el volumen de gases producidos se ven afectados por estas condiciones [14].

En el proceso de gasificación, la biomasa es sometida a elevadas temperaturas superiores a los 700 °C en una atmósfera pobre de oxígeno, de tal manera que se experimenten 4 fases: secado, pirólisis, combustión y gasificación. Los productos resultantes de este proceso son: cenizas que conforman la fase sólida, una fase líquida compuesta por agua e hidrocarburo y una gaseosa que es donde encontramos el denominado Syngas (gas renovable) que está conformado por CO , CO_2 , H_2 , CH_4 y N_2 . [16]. Dentro de las ventajas de este método de producción es que no se requiere ninguna fuente de energía externa.

- **Hidrógeno a partir de la termólisis del agua**

Es una reacción también conocida como disociación térmica de agua, que puede escribirse de la siguiente manera:



Para llevar a cabo este proceso y sea eficiente es necesario contar con una fuente de calor que sea capaz de proporcionar temperaturas superiores a 2.500 °C [14], dadas estas temperaturas de reacción la mezcla resultante debe enfriarse antes de continuar con el proceso de separación, en donde las membranas semipermeables pueden ser utilizadas a temperaturas inferiores a los 2.500°C.

- **Hidrógeno a partir de la electrólisis del agua**

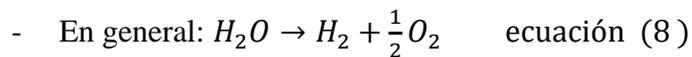
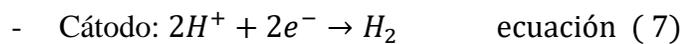
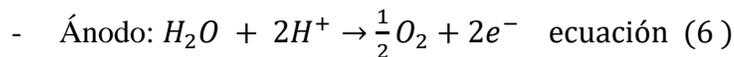
La conversión electrolítica combina reacciones de oxidación y reducción que producen hidrógeno separado del oxígeno [14].

La electrólisis del agua requiere un mínimo teórico de 237 kJ de entrada de energía para disociar cada mol de agua, esto en condiciones estándar [14]. Un electrolizador teórico que sea 100 % eficiente consumiría 142 MJ por kilogramo de hidrógeno, entre los desafíos a superar para la industrialización de este método es el alto consumo de energía y costo [14].

Existen dos tecnologías disponibles para llevar a cabo el método de electrólisis del agua, los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) y los electrolizadores alcalinos (CEA):

- **Electrolisis PEM:** este proceso utiliza electrolitos de polímero sólido para la separación de protones del agua y lograr la producción de hidrógeno y oxígeno con disociación de agua. La construcción de la pila de electrólisis consiste en celdas apiladas entre un ánodo y un cátodo, cada celda tiene un conjunto de membranas, separadores que distribuyen el agua dentro del sistema y una capa de difusión de gas.

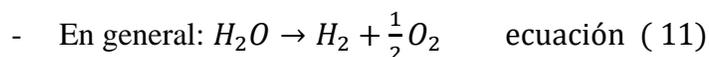
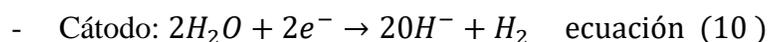
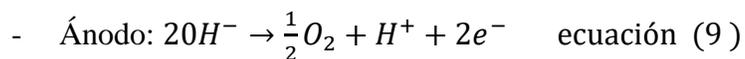
las reacciones dadas en un electrolizador PEM se dan de la siguiente manera:



Los sistemas de electrolisis PEM consisten en una pila con electrodos y membranas, una planta está constituida por tanques de agua, unidad de separación de gases, secado, bombas de recirculación, fuentes de alimentación y equipos auxiliares para garantizar el funcionamiento [9].

- **Electrólisis alcalina:** este proceso ha sido más explorado, podemos decir que es el proceso más maduro e implementado, el electrolito contiene 25 % - 30 % de hidróxido de potasio o hidróxido de sodio por peso. En su aplicación y construcción es utilizado un diafragma entre el ánodo y el cátodo para garantizar y proporcionar la separación de los gases e iones [9].

Las reacciones dadas dentro de los electrolizadores CEA se dan de la siguiente manera:



Una celda de electrólisis alcalina es un conjunto de celdas electroquímicas que descomponen las moléculas del agua líquida en hidrógeno y oxígeno. Para la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, se induce una corriente a una reacción

química no espontánea dentro de la celda y que por medio de la electrólisis del agua se genera la reacción de interés [10].

Los elementos que componen la celda de electrolisis alcalina que construiremos en este proyecto son los siguientes:

- **Electrodos:** Son dos láminas de acero inoxidable 316L (figura 1- c) con dimensiones de 200 x 200 x 1,9 mm, que funcionan como ánodo y cátodo. En el mercado podemos encontrar otros tipos de aceros como el 304 y el 306, pero para este proyecto son utilizadas las láminas de acero inoxidable 316L por su alto contenido en Níquel y Cromo, brindando una alta resistencia a la corrosión que puede ser causada por la solución del electrolito KOH (Hidróxido de Potasio). El electrodo cargado positivamente (ánodo) genera hidrógeno en ambas caras de la lámina de acero inoxidable 316L, mientras que el electrodo cargado negativamente (cátodo) generará por ambos lados oxígeno.

- **Láminas de acrílico transparente:** Son dos láminas de acrílico transparente (figura 1- a) con medidas de 200 mm x 200 mm x 8 mm que actúan como paredes exteriores, estas ayudan a mantener presionados los electrodos, sellos de neopreno y membranas, dando forma a la celda de electrólisis alcalina. Vienen perforadas y mediante unos pernos que atraviesan todo el conjunto es posible mantener la presión necesaria para que la celda sea hermética y no se presenten fugas de KOH. Se trabaja con acrílico transparente para poder observar el proceso de electrólisis para la generación de hidrógeno y mantener un control general del funcionamiento de la celda cuando se realicen las pruebas.

- **Empaques o sellos:** Son cuatro empaques de neopreno (figura 1- b) con medidas de 200 mm x 200 mm x 1 mm que logran separar los electrodos de acero inoxidable 316L, las láminas de acrílico y las membranas, formando con estas cámaras individuales. Ayudan a mantener la hermeticidad, impidiendo que el electrolito se escape de las cámaras individuales de la celda de electrólisis alcalina.

- **Membrana Techme-Zifron:** Esta membrana (figura 1-d) permite mantener separadas las moléculas de hidrógeno y oxígeno obtenidas mediante la electrólisis de una manera más eficiente, impidiendo que las moléculas separadas vuelvan a unirse nuevamente. El espacio entre electrodos y la membrana a utilizar en este estudio será de aproximadamente 1 mm.
- **Materiales misceláneos:** Estos son pernos, arandelas, tuercas y mangueras, que sirven para sujetar el conjunto de elementos que hacen parte de la celda de electrólisis alcalina.

Los electrolizadores PEM o CEA hacen parte de un sistema de generación de hidrógeno. En la figura 2 de este documento se ilustra el diagrama representativo del sistema de generación de hidrógeno, que utilizaremos para la realización de las pruebas experimentales.

Los siguientes componentes dan forma al sistema: a) panel solar policristalino, b) regulador de carga, c) batería de descarga profunda, d) interruptor bipolar, e) modulador de ancho de pulso de corriente continua, f) celda de electrólisis alcalina, g) receptor de oxígeno, h) contenedores de electrolito KOH, i) tanque colector de hidrógeno [10].

Este sistema de generación de hidrógeno se subdivide en dos sistemas: (i) sistema de suministro de energía, (ii) sistema de suministro de electrolito KOH y recolección de agentes (H_2O , H_2 y O) y medida de gases.

El primer subsistema, es el sistema de suministro de energía. Los componentes de este sistema empleados en el proyecto son:

- **Paneles solares policristalinos:** Estos paneles (figura 2-a) tienen como función principal generar electricidad para recargar la batería de descarga profunda que alimenta de energía constante a la celda de electrólisis alcalina. Se emplearon paneles solares policristalinos que es ampliamente utilizado para formar celdas fotovoltaicas las cuales se unen para formar un panel fotovoltaico.

El panel solar policristalino empleado tiene las características mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2.**Características del panel fotovoltaico**

Potencia (P_{max}) [W]	Eficiencia [%]	Tensión al Pmax [V]	Tensión circuito abierto [V]	Corriente al Pmax [A]	Corriente de corto circuito [A]
130	14.7	17.64	22.10	7.37	8.15

Fuente: Tomado de [10]

Se garantiza la energía requerida para el funcionamiento de la celda teniendo en cuenta la potencia requerida y el tiempo de operación. En el estudio que llevamos a cabo trabajamos con una potencia mínima de 5 A y una potencia máxima de 45 A con un voltaje de 12 V.

$$P = A \times V = 45A \times 12V = 540 W \quad \text{ecuación (12)}$$

Para fijar la potencia requerida se tiene en cuenta un margen de seguridad del 20% del valor de potencia calculado.

$$P = \frac{540 W \times 20}{100} = 648 W \quad \text{ecuación (13)}$$

Debemos tener en cuenta la radiación solar en la ciudad donde se realizará la prueba, en nuestro caso fue la ciudad de Bogotá. Tomamos los datos del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAN.

Tabla 3.**Promedio radiación solar diaria Bogotá (Wh/m^2 por día)**

Instituto: IDEAN				Latitud: 4,71				
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
4681,9	4312,7	4322,2	3716,7	3506	3658,9	3917,3	4168,2	3947,8
Longitud: -74,15								
Oct	Nov	Dic	Prom. anual					
3961	4017,7	4241,4	4037,7					

Fuente: Tomado de [20].

Para el cálculo de las horas solar pico al día [19] durante todo el año, utilizaremos el menor valor disponible para así asegurar que el sistema tendrá una disponibilidad de energía en el mes donde menos haya radiación solar. La siguiente ecuación nos permite calcular las HPS al día.

$$\begin{aligned} HPS/dia &= \frac{FI * R_{gsi}}{1000 \text{ W/m}^2} = \frac{\text{radiacion solar tabla}}{1000 \text{ W/m}^2} = \frac{3716,7}{1000 \text{ W/m}^2} \\ &= 3,71 \text{ HPS} \quad \text{ecuación (14)} \end{aligned}$$

Para hallar el numero de paneles se requiere el valor de energía requerido, las HPS, el factor de perdida (FP), y el valor de potencia pico del panel solar (P_{max}). El factor de perdida son aquellas condiciones que influyen en la perdida de eficiencia en el panel solar, tales como el envejecimiento y las condiciones ambientales, este puede oscilar entre 0,65 a 0.8.

Teniendo todos los datos mencionados, ya podemos obtener la cantidad de paneles solares necesarios para el sistema de suministro de energía. Este cálculo podemos obtenerlo de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \text{No. Paneles solares} &= \frac{\text{cantidad de energia requerida}}{P_{max} * FP * HPS} \quad \text{ecuación(15)} \\ \text{No. Paneles solares} &= \frac{648W}{130W * 0,77 * 3,71} = 1,74 \text{ paneles} \end{aligned}$$

- **Regulador de carga:** Este componente (figura 2-b) es utilizado para controlar la carga de la batería de manera constante. Permite el control de entrada de energía desde el panel solar a la batería, permitiendo que la batería se descargue hasta los valores mínimos permitidos y después cumpla su ciclo de carga completa de manera eficiente.
- **Batería de descarga profunda:** La batería (figura 2-c) utilizada para el sistema es de ciclo profundo, lo cual permite ser descargada por el uso del sistema

completamente, teniendo la capacidad de recuperarse de esa descarga desde sus límites mínimos (hasta un 80%) y volver a ser cargada por el panel solar. Un ciclo de carga de la batería es el tiempo transcurrido de carga desde sus niveles mínimos hasta su carga completa. Se pudo determinar la capacidad de carga necesaria para el sistema teniendo en cuenta la ecuación de capacidad de la batería y la siguiente tabla de consumo diario, que puede ajustarse según las necesidades de operación. Para efecto de nuestro estudio tomamos el valor de 4 horas debido a que son el promedio de horas de sol sobre la ciudad de Bogotá según el IDEAM [26].

Tabla 4.

Consumo diario de energía

Potencia (W)	Horas de operación (h)	Potencia total requerida (Wh/día)	Potencia total requerida más 20% margen seguridad
540 W	4 h	2160 Wh/día	2592 Wh/día

Fuente: Propia

$$Capacidad\ de\ la\ bateria(s) = \frac{Energia\ requerida\ x\ dias\ de\ autonomia}{Voltaje\ x\ profundidad\ de\ descarga\ de\ la\ bateria} \quad ecuacion(16)$$

$$Capacidad\ de\ la\ bateria(s) = \frac{2592 \frac{Wh}{día} \times 1\ día}{12\ V \times 0.8} = 270\ Ah$$

- **Interruptor bipolar de riel:** Este componente (figura 2-d) ayuda a detener el flujo de corriente cuando se alcanzan valores que sobrepasan los límites establecidos de 0 A a 45 A, que son los rangos de corriente donde se pondrá a prueba la celda de electrólisis.
- **Modulador de ancho de pulso de corriente directa:** Este elemento (figura 2-e) se encarga de controlar el flujo de corriente eléctrica que se suministra a la celda de

electrólisis alcalina. Mediante impulsos eléctricos regula la cantidad de corriente que ingresa a la celda, evitando que la celda se caliente o tenga sobre temperaturas que disminuyen su vida útil, aumentando la eficiencia en la producción de hidrógeno de la celda de electrólisis alcalina.

En la tabla 3 se especifican las características del pulse width modulator (PWM) por sus siglas en inglés, utilizado en el sistema de suministro de energía para realizar las pruebas experimentales.

Tabla 5.

Características del modulador de ancho de pulso

Max Potencia de Entrada [W]	Eficiencia [%]	Tensión circuito abierto [V]	Tensión corto circuito [V]	Corriente de carga [A]	Corriente de descarga [A]
650	98.1	8	8	50	30

Fuente: Fuente propia

Estos cinco elementos conforman el sistema de suministro de energía al electrolizador para su funcionamiento.

El segundo subsistema, es el sistema de suministro de electrolito KOH y recolección de agentes (H_2O , H_2 y O) y medida de gases, que estará compuesto por los siguientes elementos:

- **Receptor de oxígeno:** Este recipiente (figura 2-g) está conectado por medio de adaptadores y líneas de tuberías a la celda de electrólisis. En él se reciben las moléculas de oxígeno resultantes durante el proceso de electrólisis de la celda.
- **Contenedores de electrolito KOH:** Estos están hechos de tubos y láminas de acrílico transparente (figura 2-h) y almacenan el KOH utilizado para el proceso de electrólisis. Además de almacenar el electrolito necesario para producir la

electrólisis de la celda, también almacena los gases producidos de la reacción, ya que a estos contenedores llega el hidrógeno generado por la electrólisis antes de ser llevado al tanque colector de hidrogeno.

- **Botella de almacenamiento de hidrógeno y sistema de medida de gases:** Este componente es una botella de vidrio (figura 2-i) donde podemos almacenar la capacidad de 10 L de hidrógeno. Va conectado por medio de adaptadores y líneas de tubería a los contenedores de KOH, quienes en primera instancia son los receptores del hidrógeno que se produce en la electrólisis de la celda.

Es una adaptación de un tanque neumático lleno de agua que funciona bajo el uno de los principios físicos de Steven Hales, donde la presión del gas de hidrógeno en el sistema desplaza la columna de agua y ocupa el recipiente si se logra igualar la presión del sistema a la presión atmosférica [10].

Para mantener la presión del sistema igualada a la presión atmosférica se utiliza un manómetro en U.

Se van tomando las medidas cada 0,5 L que el volumen de gas va desplazando la columna de agua para tomar su lugar.

- **Materiales misceláneos:** Los siguientes materiales nos ayudan a mantener la hermeticidad del sistema de suministro de electrolito KOH y recolección de agentes (H_2O , H_2 y O), manteniendo el sistema sin fugas de electrolito KOH.
 - a) Abrazaderas
 - b) Cinta de teflón
 - c) Mangueras
 - d) Acoples

Para estos electrolizadores PEM y CEA que son los más comunes en el mercado, el porcentaje de rendimiento en las celdas PEM es aproximadamente de un 80%. Este porcentaje es considerablemente más alto que los de las celdas CEA, cuyo porcentaje de rendimiento está entre un 59% y un 70%. Además de la ventaja de mayor eficiencia, las celdas PEM poseen un consumo

de energía más bajo, y también una mejor estabilidad química y térmica. Pero presenta desventajas como una menor resistencia a las sustancias corrosivas y es una tecnología que requiere un mayor presupuesto que las celdas CEA, debido a los altos costos en los materiales para su fabricación [10].

1.2 Aplicaciones para el aprovechamiento del hidrógeno como recurso energético

Se tiene cuatro sectores interesados en el aprovechamiento del hidrógeno como recurso energético, estos son:

- Industrial:
- Residencial
- Almacenamiento de energía
- Transporte

En la descarbonización del transporte encontramos la implementación de los FCEV (full cell electric vehicle), son vehículos que tienen un rango de conducción y tiempo de repostaje similar a los vehículos convencionales, dadas estas características extienden el campo de aplicación de movilidad eléctrica a segmentos de trabajo de alto nivel, como lo son vehículos que recorren trayectos más extensos y son de uso frecuente, entre estos los autobuses, trenes, camiones, vehículos unitarios como maquinaria industrial (carretillas elevadoras), donde las baterías de este ciclo tienen limitaciones [21].

A continuación, veremos qué diferencias existen entre los vehículos BEV y FCEV, notamos la ventaja que tienen estos vehículos para competir en el mercado actual.

Es notable como:

Los BEV se ajustan a las necesidades de vehículos que recorren distancias cortas, dado que son más pequeños y ligeros.

Los FCEV por otro lado son adecuados para vehículos más pesados, de uso cotidiano y que recorren trayectos más extensos (autobuses regionales, camiones) y aquellos de uso continuo como lo son los vehículos de servicio público (taxis).

Combustibles sintéticos a base biológica y H_2

Los FCEV tienen una gran oportunidad en el mercado actual de los vehículos pesados, principalmente hablado en Estados Unidos y países europeos como Alemania, Suiza, se espera la implementación de autobuses de pila de combustible y que el despliegue de estos sea exponencial en los próximos años, los costos de producción han disminuido notablemente en los últimos años y se espera que continúe con esa tendencia a medida que aumente la demanda e implementación en otras partes del mundo.

Varios fabricantes del sector automotriz globales, como Hyundai, Honda, Toyota y el fabricante chino SAIC han iniciado la comercialización en ciertas regiones del mundo incluyendo California, Japón, China y Europa.

1.3 Casos de estudio de aplicaciones del hidrógeno como un facilitador de la transición energética en otros países.

Durante varios años el estudio del hidrogeno como un facilitador para la transición energética es una realidad en países de la unión europea como Alemania y en países de Asia como China y Japón. Países en los que se vienen desarrollando proyectos con avances importantes hacia la aplicación del hidrógeno como combustible principal, buscando una movilidad de cero emisiones contaminantes. En el año 2006 fue lanzado por el gobierno alemán el Programa nacional de innovación para hidrogeno y tecnologías de celdas de combustible (NIP – National Innovation program), que buscaba acelerar el desarrollo de productos tecnológicos para el futuro [18].

Las compañías líderes de la iniciativa de movilidad H_2 , en septiembre del 2009 se inició la primera de tres fases, donde trabajaban en desarrollo y la implementación de un modelo de negocio que les permita construir infraestructura para el abastecimiento de hidrogeno por toda Alemania y para el año 2015 se terminó la tercera fase con un proyecto conjunto entre el gobierno alemán y todas esta compañías, cuyo objetivo principal era construir estaciones de abastecimiento de hidrogeno para vehículos. Con proyectos como estos países vecinos como el Reino Unido y Francia han iniciado el estudio de proyectos similares al del NIP [18].

En América latina también se están llevando a cabo proyectos que buscan hacer una transición a energías verdes. En el desierto de atacama en Chile se construyó una planta solar que hace parte del programa nacional de energía chileno. Este proyecto busca utilizar la energía solar como vector energético económico y sustentable para uso doméstico y para exportar también energía a otros países. El ministerio de energía chileno ha identificado sectores estratégicos como

la minería, sectores energéticos y la industria química para el suministro de hidrógeno a corto plazo, mientras que la exportación a países como Japón que son considerados potenciales clientes por su alta demanda de hidrógeno, al tener en operación más de 100 estaciones de servicio y más de 3600 vehículos impulsados por hidrógeno, es considerado un objetivo a largo plazo [19].

1.4 Oportunidades de aplicación del hidrógeno en Colombia

Desde hace aproximadamente veinte años, los gobiernos colombianos han introducido normativas orientadas a la promoción del uso racional y eficiente de energía, y más recientemente de las energías renovables. En ese sentido, y siguiendo las tendencias internacionales, el hidrógeno ha cobrado un rol relevante en la transición energética a nivel mundial. En Colombia se está dando un impulso inicial al hidrógeno como una alternativa energética. El Ministerio de Medio Ambiente de Colombia anunció una meta de reducción de 51 % en la emisión de gases de efecto invernadero para 2030. Esa meta está enmarcada en los resultados obtenidos en la actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia - NDC [22]. En este sentido, este capítulo busca hacer una recopilación de la trayectoria legislativa en Colombia referente al hidrógeno y las tendencias a nivel mundial que podrían ser un indicativo para el desarrollo del hidrógeno en Colombia.

1.4.1 Trayectoria legislativa del hidrógeno en Colombia

En Colombia desde la década de los dos mil se han emitido documentos legislativos que buscan promover el uso racional de los recursos energéticos. El punto de partida fue la Ley 697 de 2001 conocida como la ley de Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE). Esta ley buscaba que por medio del uso racional y eficiente de la energía se asegure el abastecimiento energético nacional. Adicionalmente, esta ley definió como fuentes no convencionales de energía aquellas disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Según esta definición el hidrógeno se considera una fuente no convencional de energía. Sin embargo, más

adelante la ley define detalladamente esas fuentes energéticas y entre ellas no se encuentra el hidrógeno¹.

Con el objetivo de continuar promoviendo el uso racional de la energía, la Ley 788 de 2002, que introdujo una nueva reforma tributaria en Colombia, incluyó incentivos en este aspecto. En el artículo 18 de esta reforma tributaria se establece la exención a las rentas generadas por la venta de energía eléctrica que usen recursos renovables como eólicos, biomasa o residuos agrícolas, realizada únicamente por las empresas generadoras, por un término de 15 años siempre y cuando se cumplan unos requisitos. Entre estos requisitos estaban tramitar, obtener y vender certificados de emisión de dióxido de carbono de acuerdo con los términos del Protocolo de Kyoto. Además, que al menos el 50% de los recursos obtenidos por la venta de dichos certificados sean invertidos en obras de beneficio social en la región donde opera el generador. Nuevamente dentro de los recursos no convencionales de energía no se encuentra el hidrógeno.

En 2003 el presidente de la República promulgó el decreto 3683 que reglamentó la ley URE de 2001; además, creó una comisión intersectorial para el uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales de energía - CIURE. El objetivo de esta comisión intersectorial fue asesorar y apoyar al Ministerio de Minas y Energía - MME en la coordinación de políticas sobre uso racional y eficiente de la energía, y demás formas de energía no convencionales en el sistema interconectado nacional y en las zonas no interconectadas. Las funciones de esa comisión contemplan coordinar la consecución de recursos nacionales o internacionales para desarrollar los programas de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales de energía e identificar nuevas fuentes y la consolidación de las existentes. En decir, el CIURE era el encargado de recomendar las nuevas fuentes de energía que se deban clasificar como no convencionales para ser sujetas de promoción.

Desde la emisión de ese decreto pasó un tiempo sin cambios legislativos en el asunto de las energías renovables, fue en 2014 con la promulgación de la Ley 1715 cuando las energías renovables vuelven a tomar importancia en la diversificación y transición energética. El propósito de esta ley es promover el uso de fuentes de energía no convencional en el sistema energético, la

¹ El hidrógeno es altamente reactivo, eso hace que no se encuentre libre en la naturaleza. eso hace que el hidrógeno no sea una fuente de energía si no un vector energético, porque se requiere energía para producirlo (ref: ruta del hidrógeno).

eficiencia energética y la respuesta de la demanda. Dentro de las definiciones de esta ley se introduce los términos de auto generación que es la actividad realizada por una persona natural o jurídica para producir energía eléctrica y atender su propia demanda. En cuanto a las energías renovables no convencionales se encuentran la biomasa, las energías del océano, las pequeñas centrales hidroeléctricas, la energía eólica, geotérmica, y solar. Como novedad en esta ley se contempla el aprovechamiento de las energías del océano. No obstante, aún no se incluye al hidrógeno como fuente de energía.

En 2020 el Congreso de Colombia promulgó la Ley 2036 para promover la participación de las entidades territoriales en los proyectos de generación de electricidad usando energías renovables. Esta ley autoriza al Gobierno nacional para financiar con aportes del presupuesto general de la nación y el sistema de regalías, a través de las entidades territoriales, proyectos de generación de electricidad con fuentes de energía no convencional renovables como: biomasa, la energía eólica, solar, geotérmica, aprovechamientos hidroeléctricos, hidrógeno verde, de los mares y el aprovechamiento energético de residuos. Con esta ley se amplían las energías renovables que son consideradas como no convencionales e incluye al hidrógeno verde. Esto permite que estas fuentes se beneficien de los incentivos de promoción.

En 2020 en el congreso de Colombia se presentó el proyecto de ley de transición energética que buscaba modificar artículos de las leyes 56 de 1981, 142 y 143 de 1994 y 1715 de 2014 para fortalecer la transición energética. Por otro lado, el MME y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) publicaron el documento hoja de ruta del Hidrógeno en Colombia. Estas dos publicaciones marcaron el punto de partida para la inserción del hidrógeno en Colombia. En el documento del MME y el BID se destaca la importancia que se está dando al hidrógeno para impulsar la transición energética a nivel mundial y resalta las inversiones hechas por Alemania, Francia, Japón y Corea del Sur para desarrollar este energético en sus países. El interés en el hidrógeno, principalmente producido con energías renovables conocido como hidrógeno verde, se ha visto reflejado en el crecimiento de proyectos de este tipo, en Alemania se presentó un plan de construcción de una planta de 100 MW para electrólisis [24].

Siguiendo las tendencias internacionales, en 2021 el congreso de la república promulgó la Ley 2099 de transición energética. El objetivo del documento legislativo es actualizar la legislación de promoción de energías renovables, es decir modificar la Ley 1715 de 2014. Una de las modificaciones fue incluir dentro de las definiciones al hidrógeno verde y azul. El primero es

el producido a partir del aprovechamiento energético de la biomasa, el agua a través de pequeñas centrales hidroeléctricas, el viento, el sol, el mar y la temperatura de la Tierra. El hidrógeno azul es el producido con combustibles fósiles, particularmente por la descomposición del metano; sin embargo, si éste tiene asociado un sistema de captura, uso y almacenamiento de carbono se considerará una fuente no convencional de energía renovable [23].

La inclusión del hidrógeno dentro de las definiciones de la Ley 2099, hacen que este energético pueda ser sujeto de los instrumentos y mecanismos de promoción establecidos en la Ley 1715. En ese sentido, se busca que este marco regulatorio del impulso para la producción de hidrógeno en Colombia. Sin embargo, es importante resaltar que los costos de producción de hidrógeno aún no son competitivos en la mayoría de los mercados energéticos, se necesita crear una demanda suficiente que haga que sus costos caigan e incentive la construcción de la infraestructura necesaria para la producción y distribución de este combustible. Sin embargo, en mercados como el norte americano y europeo los costos de fabricación de electrolizadores alcalinos cayeron un 40 % entre 2014 y 2019, y en China se fabrican sistemas hasta 80 % más baratos que los de occidente. Estas reducciones en los costos indican que si la manufactura de electrolizadores continúa creciendo, y los costos cayendo, el hidrógeno renovable podría ser generado por un valor de US \$0,7 a US \$1,6/kg en una gran parte del mundo para 2050 [25].

1.4.2 Nichos de oportunidad para el hidrógeno en Colombia

En Colombia la implementación del hidrógeno como vector energético es aún incipiente; sin embargo, es importante conocer las perspectivas nacionales respecto al potencial que podría tener éste como energético. El documento ruta para el hidrógeno publicado por el ministerio de minas y energía muestra algunas de ellas en 2021. Este documento resalta las fortalezas de Colombia para la producción de hidrógeno azul debido a las reservas de gas natural, carbón y petróleo del país. Además, la abundancia en recursos energéticos renovables como agua, irradiancia solar y viento son un incentivo para la producción de hidrógeno verde. Éste último método de producción de hidrógeno contribuiría a alcanzar la meta de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del 51 % para 2030 propuesta por el gobierno. Este es una meta ambiciosa considerando que los sectores de agricultura, ganadería y minas y canteras, que representan el 13 % del PIB, son grandes emisiones de gases

(<https://cods.uniandes.edu.co/hidrogeno-verde-una-alternativa-para-el-futuro-de-la-energia-en-colombia/>). Esto indica que, para lograr las metas fijadas por el gobierno, es necesario actuar principalmente en la reducción de emisiones de gases en los tres sectores mencionados a través de la transición energética, donde se busca que el hidrógeno tenga un rol determinante.

Metodología

2. Construcción de la celda de electrolisis alcalina y ensamble del sistema de generacion de hidrogeno

Dentro de esta sección se describe los procedimientos de construcción y ensamble de la celda de electrolisis alcalina y el sistema de generación de hidrógeno respectivamente. Durante la lectura podremos hacernos una idea de cómo fue el proceso de construcción.

2.1 Construcción de la celda de electrolisis alcalina

A continuación, se describe el procedimiento utilizado para la construcción y ensamblaje de la celda de electrolisis alcalina, se describe por pasos desde la fabricación de algunas partes hasta el ensamble de las piezas necesarias para obtener la celda.

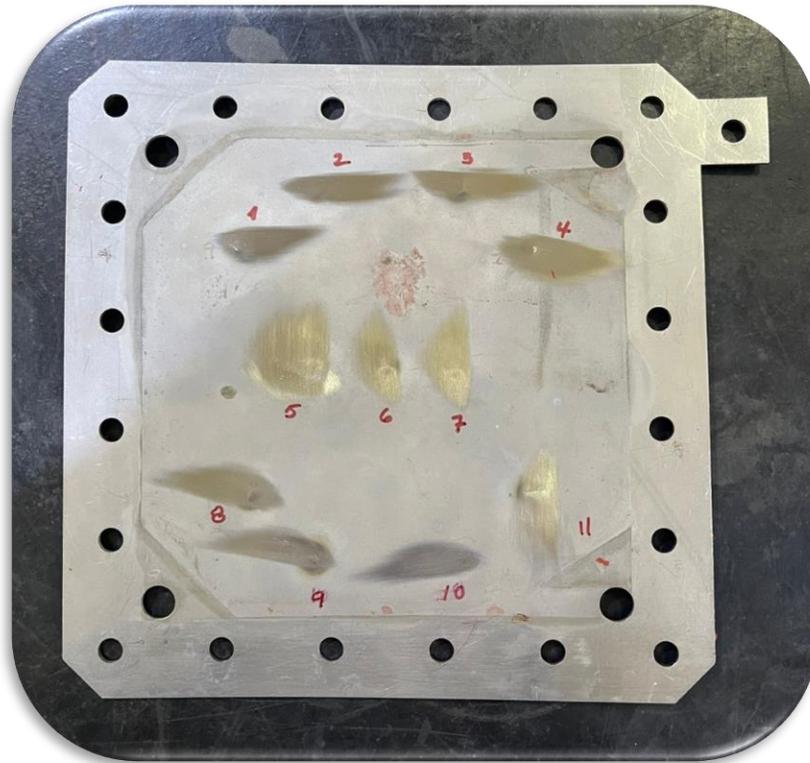
Para el proceso de armado es necesario contar con los siguientes elementos adicionales:

- Arandelas, tuercas, silicona acrílica para sello, lija # 80.

Paso 1: Realizar cortes en lamina de acero inoxidable 316L con medidas de 200 mm x 200 mm x 1,9 mm, luego realizar 20 perforaciones para tornillo de 7/16" (pulgada) en sus extremos. La figura 7 muestra un electrodo de la celda de electrolisis alcalina.

Nota: los cortes y perforaciones de la celda fueron realizados en un CNC para aumentar precisión.

Figura 6. Electrodo

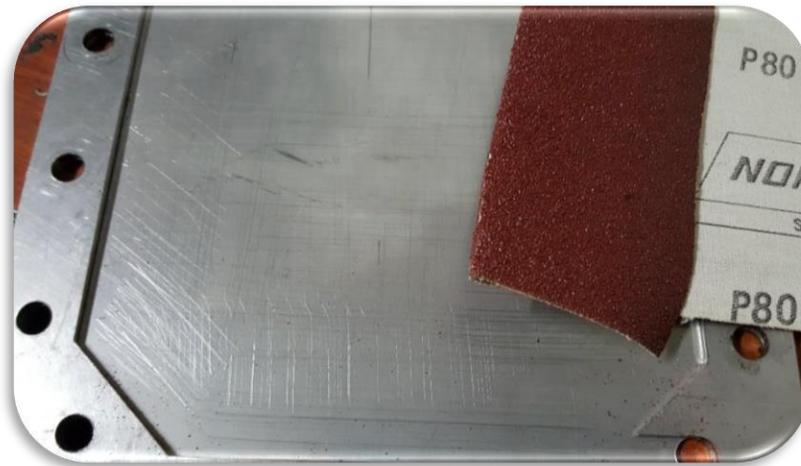


Fuente: Fuente propia

Paso 2: Cubrir con cinta de enmascarar el área de sello del electrodo y lijar el área expuesta al electrolito, para garantizar hermeticidad entre las celdas durante el proceso de armado, posteriormente se retira la cinta del área de sello y se limpia con solvente desengrasante el electrodo por ambas caras para retirar impurezas.

Nota: La figura 8 muestra el lijado del electrodo, el área expuesta al electrolito es lijada para aumentar la abrasión del electrolito y ampliar la eficiencia del proceso de electrolisis.

Figura 7. Lijado del electrodo



Fuente: Fuente propia

Paso 3: realizar corte de láminas de acrílico transparente con medidas de 200 mm x 200 mm x 8 mm, realizar 20 perforaciones para tornillo de 7/16" (pulgada) en sus extremos y 4 perforaciones excéntricas para la conexión de entrada y salida de electrolito con medidas de ¼ NPT.

Nota: los cortes y perforaciones del acrílico fueron realizados en un CNC para aumentar la precisión.

Paso 4: realizar cortes de los empaques de neopreno con medidas de 200 mm x 200 mm, se debe garantizar un área de sello de aproximadamente 1" (pulgada).

Nota: La figura 9 muestra los sellos de neopreno. Los cortes de los empaques fueron realizados de forma manual, pueden realizarse con una maquina laser o de forma manual.

Figura 8. Sellos de neopreno



Fuente: Fuente propia

Paso 5: realizar cortes de las membranas Techme-zifron de 1 mm de espesor, la figura 10 muestra la membrana utilizada.

Figura 9. Membrana Techme-Zifron



Fuente: Fuente propia

Paso 6: realizar cortes de material aislante con el diámetro y longitud de los pernos con que se ensamblaran las partes de la celda (acrílicos, empaques, membranas, electrodos), estos se colocaran en el cuerpo de perno para evitar contacto con la solución de KOH en caso tal se presente algún tipo de fuga.

Paso 7: en este paso se procede a realizar el armado de la celda.

- **Punto 1:** insertar perno en manguera aislante (este paso se repite por el número de pernos que se van a utilizar)
- **Punto 2:** instalar perno a perno en las 20 perforaciones del acrílico
- **Punto 3:** aplicar una capa delgada de silicona de sello, rodeando los pernos.

Este punto debe repetirse en cada elemento que se va a colocar durante el ensamble (acrílico, empaque de neopreno, electrodo y membrana), se realiza para mejorar la hermeticidad de la celda. En la figura 11 se ilustra este punto.

Figura 10. Instalación de pernos y capa de silicona



Fuente: Fuente propia

- **Punto 4:** colocar un empaque de neopreno y repetir el punto 3. La figura 12 muestra la instalación del sello.

Figura 11. Instalación de sellos de neopreno



Fuente: Fuente propia

- **Punto 5:** colocar electrodo y repetir el punto 3.
- **Punto 6:** colocar empaque de neopreno y repetir el punto 3.
- **Punto 7:** colocar membrana Techme-zifron y repetir el punto 3.
- **Punto 8:** repetir desde el punto 4 al 7 de acuerdo con el número de electrodos que tenga la celda, en efecto de este proyecto se utilizaron 2 electrodos.
- **Punto 9:** colocar acrílico.
- **Punto 10:** colocar arandela y tuerca, aplicar torque aproximado de 20 Libras/pie. La figura 13 muestra la celda de electrolisis armada y con sus tornillos ajustados.

Figura 12. Ensamble total de celda de electrolisis



Fuente: Fuente propia

Paso 8: realizar prueba de hermeticidad aplicando aire por una de las entradas y tapando la salida de la celda, utilizar agua jabonosa para identificar fugas, si se identifica fuga en algún punto repetir el punto 10, aplicando torque controlado a los pernos hasta corregir la fuga.

2.2 Emsamble del sistema de generacion de hidrogeno

Al tener todos los elementos de la celda de electrolisis alcalina ya instalados y los tornillos debidamente ajustados, procedemos a instalar todos los componentes del sistema de generación de hidrogeno.

Paso 1: se ensambla el tanque contenedor del electrolito (KOH), que consta de unas láminas de acrílico transparente y unos tubos de acrílico transparentes. las láminas de acrílico han sido maquinadas a la medida de los tubos de acrílico, buscando con ellos que el efecto de sellado

en el contenedor sea muy alto y no se vayan a tener fugas de KOH o de los gases separados en la electrólisis.

Paso 2: una vez la celda de electrólisis y el tanque contenedor de KOH estén ensamblados, se coloca teflón sobre la rosca de los adaptadores de pvc y se instalan a la celda y después al tanque. Unimos los adaptadores que se encuentran en la parte inferior de la celda con ayuda de mangueras posicionamos el contenedor por encima de la celda de electrólisis para que por acción de la gravedad el electrolito baje a la celda y esta tenga suministro del electrolito de manera constante.

Paso 3: se instalan mangueras a los adaptadores conectados a la celda de electrólisis y se ajustan por medio de abrazaderas para mantener la presión y evitar fugas de gas o de electrolitos. Los adaptadores conectados en la parte inferior de la celda van unidos mediante la manguera y abrazaderas a los adaptadores instalados en la parte inferior de los contenedores del electrolito que fueron colocados arriba de la celda. Por medio de estas correcciones se suministrará el electrolito a la celda de electrólisis.

Paso 4: los adaptadores ubicados en la parte superior de la celda que están más cercanos al electrodo cargado positivamente (ánodo), van unidos por una manguera y abrazaderas a los adaptadores en T que están conectados a la parte superior de los contenedores de electrolito (KOH). Estas conexiones recogen la mayor parte del hidrógeno generado por la celda de electrólisis.

Paso 5: los adaptadores que van conectados en la parte superior de la celda que están cerca al electrodo cargado negativamente (cátodo), se conectan al receptor de oxígeno.

Paso 6: se une por medio de mangueras y abrazaderas el adaptador en T del tanque de almacenamiento de hidrógeno de 10 litros de capacidad, a los adaptadores en T ubicados en la parte superior de los contenedores de electrolito (KOH). En este tanque obtendremos un volumen máximo de 10 L de hidrógeno.

Paso 7: cableamos los electrodos (ánodo y cátodo) y los conectamos al modulador de ancho de pulso (PWM). El electrodo cargado positivamente (ánodo) lo conectamos a la señal positiva del modulador de ancho de pulso y el electrodo cargado negativamente se conecta a la salida negativa del modulador de ancho de pulso. También se cablea una línea de conexión a tierra para el PWM.

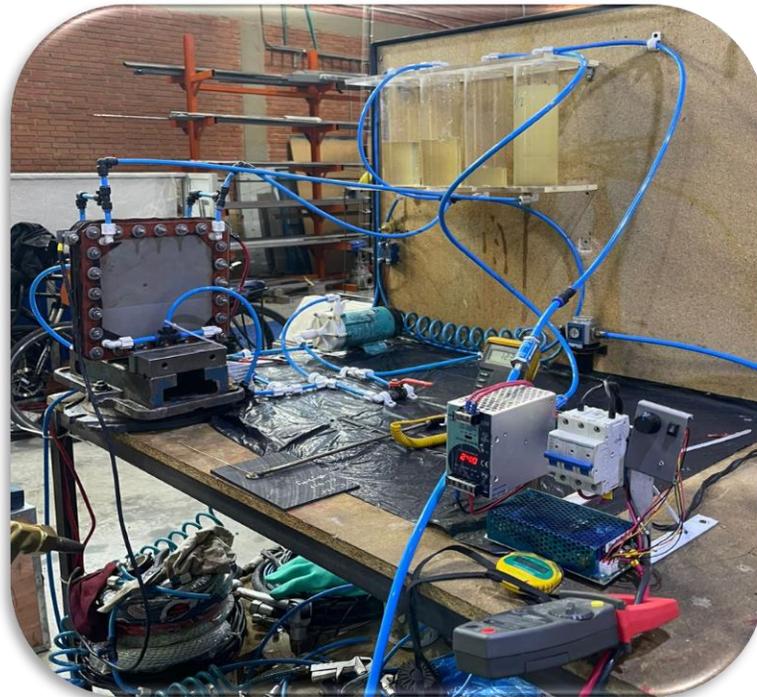
Paso 8: se interconectan la salida del interruptor bipolar de riel a la entrada positiva del PWM. Mientras que la salida negativa de la batería de descarga profunda es conectada a la entrada negativa del PWM.

Paso 9: se conecta eléctricamente mediante cableado la salida positiva del regulador de carga a las entradas del interruptor bipolar de riel y de la batería de descarga profunda. La salida negativa del regulador de carga está conectada a la entrada negativa de la batería.

Paso 10: para completar todas las conexiones del sistema de generación y la celda de electrólisis, conectamos las salidas (positiva y negativa) del panel solar fotovoltaico a las entradas (positiva y negativa) del regulador de carga. El regulador de carga está configurado para entregar valores de 12 Voltios fijos y entre 0 a 45 Amperios de corriente.

Nota: Las figuras 13 ,14 y 15 muestran el sistema de suministro de energía, instalación paneles solares y batería de descarga profunda. Las figuras 16 y 17 muestran el sistema de recolección de agentes (H_2O , H_2 y O) y medida de gases.

Figura 13. sistema de suministro de energía



Fuente: Fuente propia

Figura 14. Instalación de paneles solares



Fuente: Fuente propia

Figura15. Batería de descarga profunda



Fuente: Fuente propia

Figura 16. Sistema de recolección de agentes (H_2O , H_2 y O)



Fuente: Fuente Propia

Figura 17. Sistema de medición de gas



Fuente: Fuente propia

Figura 18. Botella de almacenamiento de gas



Fuente: Fuente propia

3. Resultados y discusiones

3.1 Pruebas realizadas a la celda construida

Las pruebas realizadas a la celda de electrólisis se llevaron a cabo en el laboratorio de la empresa Tecnomedición. Las condiciones de temperatura en el laboratorio son de alrededor de 23 grados centígrados y una presión promedio de 0.7488 atm.

Se realizaron un total de nueve pruebas a la celda de electrólisis. Las pruebas consisten en inducir una tensión de 12 Voltios fijos, haciendo variar la corriente aplicada de 0 a 45 Amperios (5 A, 10 A, 15 A, 20 A, 25 A, 30 A, 35 A, 40 A y 45A).

Dentro de la celda de electrólisis tenemos una solución electrolítica de un cuarenta por ciento de hidróxido de potasio (KOH), por lo cual esta celda de electrólisis es considerada una celda tipo seca. La distancia de separación de los electrodos de esta celda de electrólisis es de aproximadamente 1 mm, disminuyendo así el espacio entre electrodos de la celda estudiada previamente en el artículo base “Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen production at atmospheric pressure” donde se estudió el caudal de generación de hidrógeno a una distancia de electrodos de 7 mm, 11 mm y 17 mm [10].

Las variables a tener en cuenta en este proyecto fueron el caudal de generación de hidrógeno de la celda (Q) dado en m^3/h , la eficiencia de la celda dada con la ecuación $\eta_{\text{celda electrolisis}} = \frac{Q * (HHV_{H_2})}{V * I}$, mientras que la eficiencia del sistema dada con la ecuación $\eta_{\text{sistema}} = (\text{eficiencia panel PV}) * (\eta_{\text{celda electrolisis}})$.

El cálculo del caudal de la celda se obtiene al dividir el volumen del tanque de almacenamiento de hidrogeno de 10 L, entre el tiempo que transcurre en llenarse el tanque de almacenamiento, $\text{Caudal } (Q) = \frac{10 \text{ L}}{T_{\text{min}}}$, este valor nos dará en m^3/min . Es necesario normalizar el valor del caudal generado por la celda de electrolisis, porque se busca estandarizar los datos y que estos puedan ser utilizados en cualquier lugar, en condiciones de temperatura y presión diferentes. Cuando alguien este interesado en el posterior desarrollo e investigación de este tipo de tecnología pueda tener este trabajo como referencia previa. Multiplicamos el caudal obtenido previamente por el resultado de la división de la suma de los grados centígrados más la equivalencia de temperatura en grados Kelvin, este resultado lo multiplicaremos a su vez por el resultado de la división de la presión atmosférica en el lugar donde se realizará la prueba, que en nuestro caso fue la ciudad de Bogotá, entre la presión atmosférica estándar en kilo pascales 101.325 kPa, la ecuación resultante nos quedaría de la siguiente forma

$$\text{Caudal Normalizado}(NQ) = Q * \frac{\text{grados centigrados}(\text{°C}) + 273 \text{ K}}{273 \text{ K}} * \frac{101.325 \text{ kPa}}{72.87 \text{ kPa}}$$

La eficiencia de la celda es calculada primeramente hallando la energía ganada por la celda, para esto tomamos el valor del caudal de la celda (Q) y lo multiplicamos por el alto valor de

calentamiento del hidrogeno o por sus siglas en ingles HHV_{H_2} (high heating value), $energía\ ganada = Q * (HHV_{H_2})$, el producto de esta operación nos dará en J/seg que es equivalente a vatios (W). El resultado de la energía ganada es dividido por el resultado del producto de la cantidad de amperios por el voltaje que se le esta aplicando a la celda,

$$\eta\ celda\ electrolisis = \frac{Q * (HHV_{H_2})}{V * I}$$

Por último, calculamos la eficiencia del sistema tomando la eficiencia del panel fotovoltaico, que es cantidad de energía entregada por el panel solar dividida entre el producto del área del panel, por una constante de radiación solar bajo condiciones de pruebas estándar,

$eficiencia\ panel\ PV = \frac{energía\ entregada\ PV\ (W)}{Area\ PV * 1000\ W/m^2}$ y multiplicándola por la eficiencia de la celda de electrolisis, $\eta\ sistema = (eficiencia\ panel\ PV) * (\eta\ celda\ electrolisis)$.

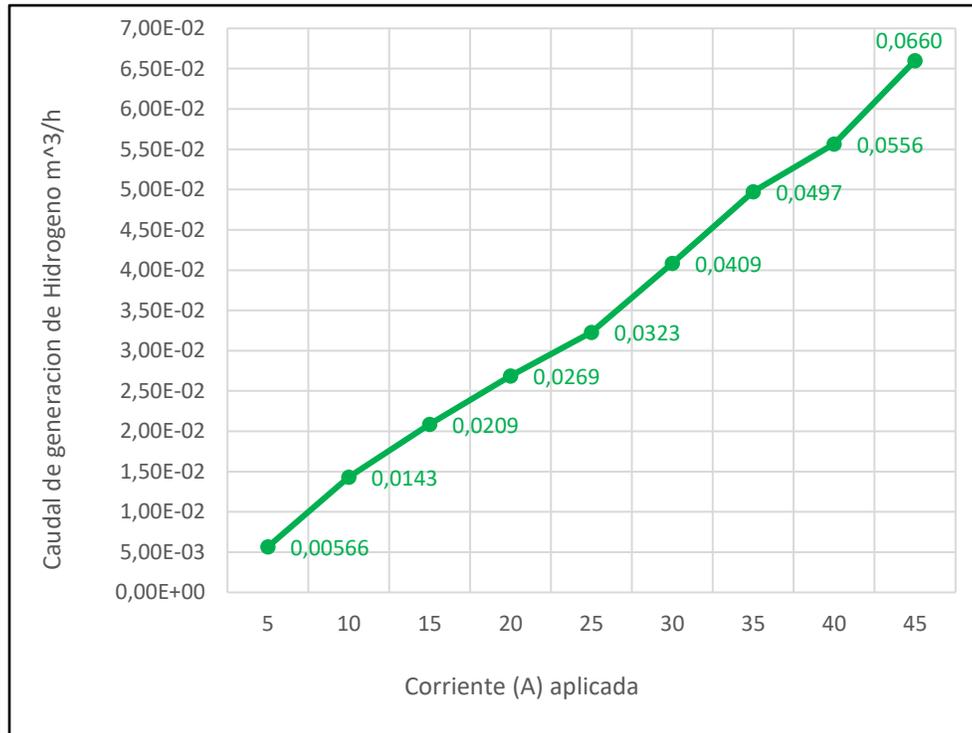
3.2 Resultados obtenidos de las pruebas

Llevamos a cabo nueve pruebas experimentales para el desarrollo de este proyecto. Cada una de las pruebas fue tomada en un valor de entre 5 A a 45 A de corriente. En la figura 19 podemos observar un caudal m^3/h que aumenta gradualmente conforme vamos aumentando la corriente aplicada. Por lo que podemos afirmar que, a mayor corriente aplicada, mayor será el caudal Nm^3/h de generación de hidrogeno en la celda de electrolisis alcalina.

Durante los sets de pruebas realizadas a la celda, encontramos que a medida que aumentamos un set de corriente, el promedio que aumento el caudal de generación de hidrogeno es de $0.007333\ Nm^3/h$, este aumento promedio corresponde a un 11,106 % de $0.0660\ m^3/h$, el cual fue el valor máximo de caudal de generación de hidrogeno alcanzado para llenar el tanque de almacenamiento de hidrogeno que tiene un volumen final de $0.0005\ m^3$ (0.5L).

También se pudo determinar los sets de corriente donde se da mayor y menor generación de hidrogeno. En el set de 20 A a 25 A, la cantidad de hidrogeno generada es de $0.0054\ Nm^3/h$, que corresponde a un 8.18% del caudal, por lo que corresponde al set donde se genera menos hidrogeno. Mientras que en el set de 40 A a 45 A es donde se genera mayor volumen de hidrogeno, el valor generado de $0.0104\ Nm^3/h$ correspondería a un 15.75% del caudal.

Figura 19. Caudal celda 1mm de separación entre electrodos (Nm^3/h)

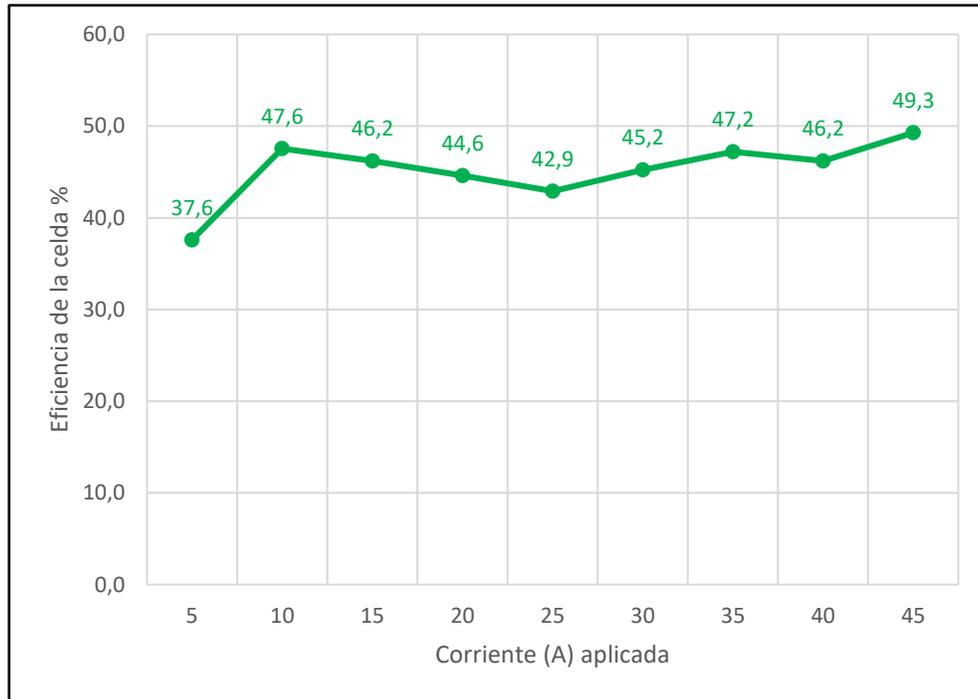


Fuente: Fuente propia

En la figura 20 podemos ver la eficiencia de la celda de electrolisis alcalina, aquí podemos observar picos de rendimiento donde la celda ha sido más o menos eficiente dependiendo del set de corriente que se le ha aplicado. El promedio de eficiencia de la celda durante los nueve sets de corriente que se le aplicaron corresponde a un 45.2%.

Si tomamos en consideración que el mayor porcentaje de eficiencia es dado en el set 45 A con 49.3% de eficiencia, y asumiendo este set de 45 A como nuestro 100% de eficiencia al ser el mayor valor obtenido. Podemos comparar el comportamiento de la celda entre el set de 5 A donde tenemos la eficiencia de 37.6% que corresponde al menor valor de eficiencia registrado, frente al set de 45 A. Tomando el valor de 37.6 con respecto al 100% asumido en el set de 45 A, el set de 5 A estaría en un porcentaje del 76.26% dejando así claro que estaría por debajo del rendimiento un 23.74% con respecto al punto máximo de eficiencia (49.3%).

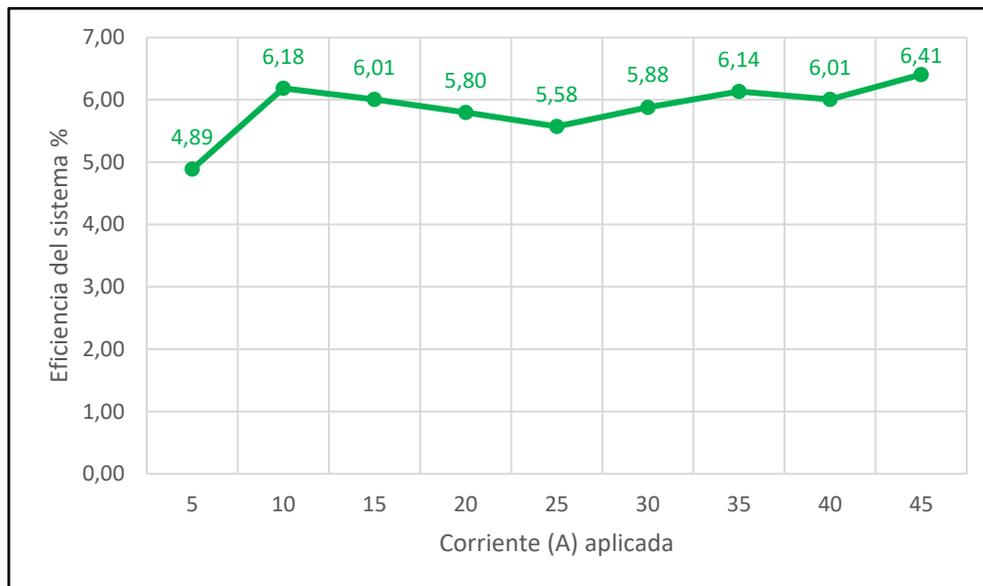
Figura 20. Eficiencia celda 1mm de separación entre electrodos (W)



Fuente: Fuente propia

En la figura 21 podemos ver el comportamiento de la eficiencia del sistema, el cual es similar al comportamiento registrado de la eficiencia de la celda de electrolisis, con picos altos y bajos de rendimiento, pero coincidiendo en el punto de mayor y menor eficiencia con 45 A para el set de mayor eficiencia del sistema y 5 A para el set con menor valor de eficiencia del sistema.

Los valores correspondientes al punto de mayor eficiencia del sistema son de 6.41%, mientras que el valor para el punto de menor eficiencia del sistema es de 4.89%, y el promedio de eficiencia para todos los sets de corrientes aplicadas sería un 5.87%.

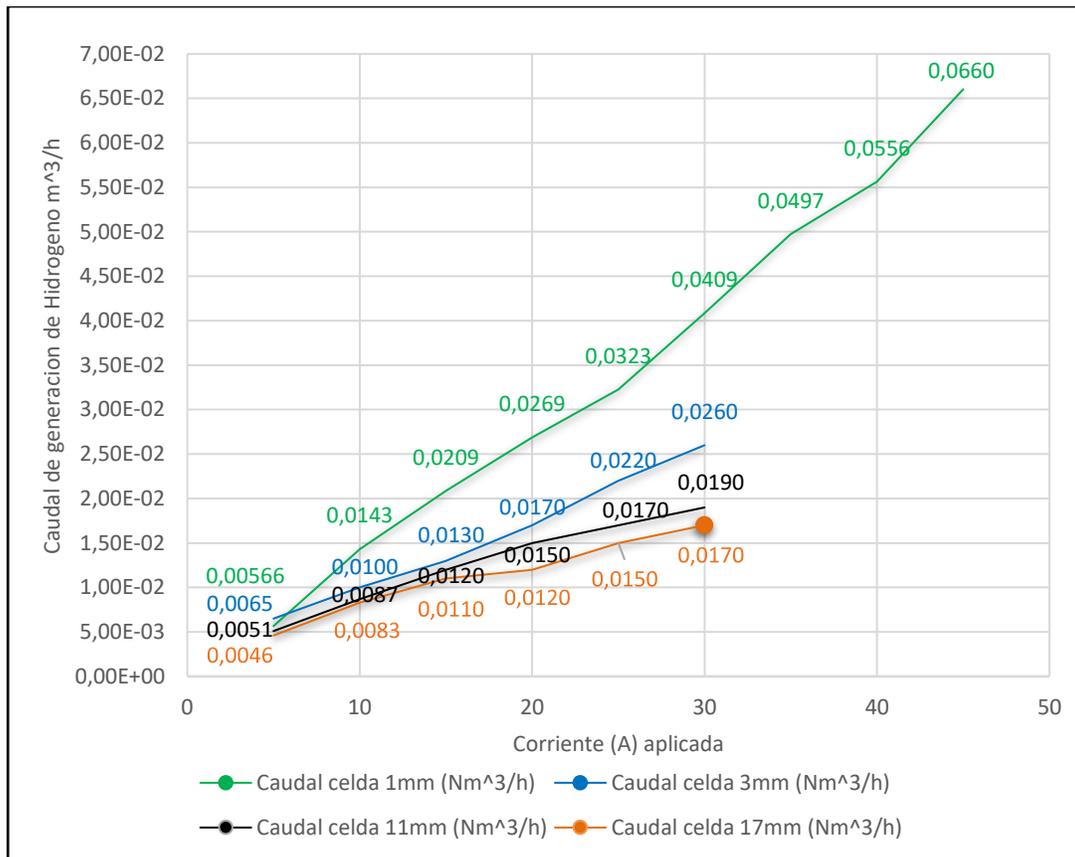
Figura 21. Eficiencia sistema 1mm de separación entre electrodos (W)

Fuente: Fuente propia

3.3 Discusión de los resultados obtenidos

En la figura 22 podemos ver la comparación de las pruebas realizadas a la celda de electrolisis alcalina con separación entre electrodos de 1mm de este proyecto, contra las pruebas hechas en el artículo base “Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen production at atmospheric pressure”, pruebas las cuales la distancia de los electrodos era de 7 mm, 11 mm y 17 mm respectivamente [10].

Figura 22. Comparativa configuración de celdas (caudal Nm^3/h vs. Corriente)

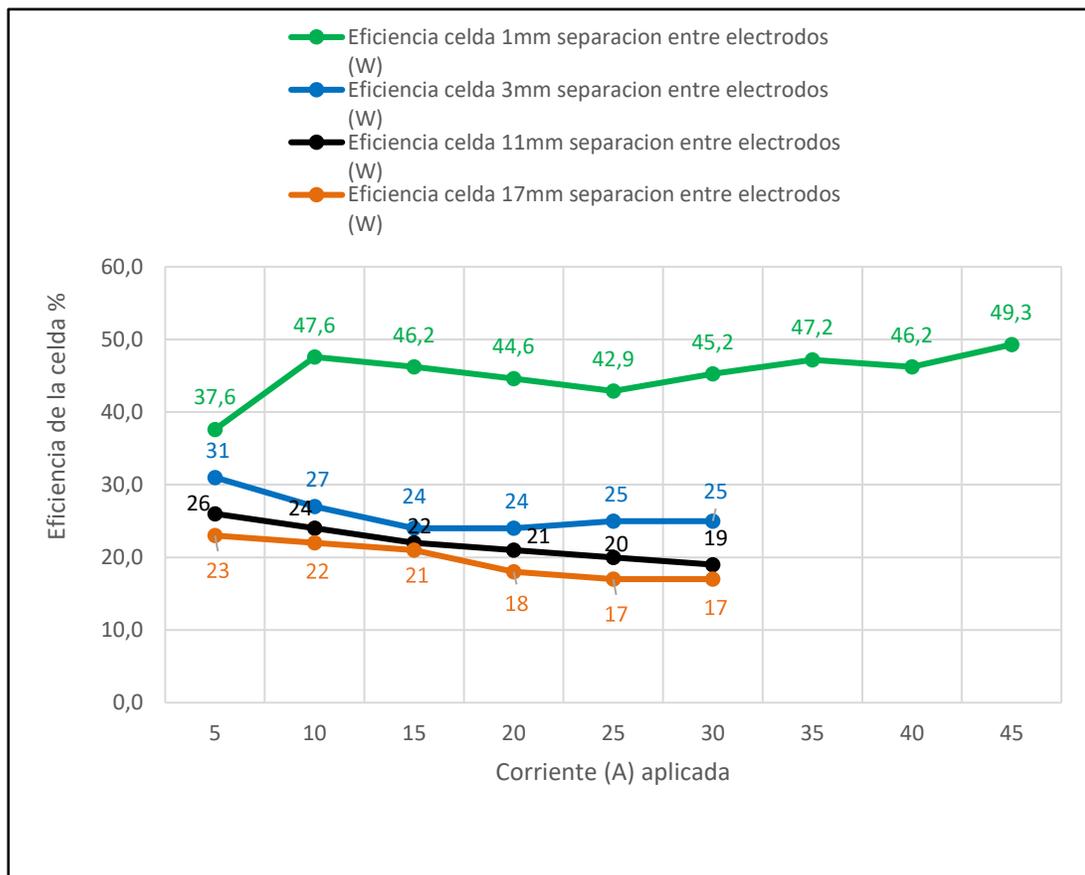


Fuente: Fuente propia

Durante las pruebas realizadas en el artículo base se encontró que la celda con espacio entre electrodos de 3 mm tenía un porcentaje de generación de hidrogeno entre el 21% y el 35% mayor que las celdas con separación de electrodos de 11 mm y 17 mm [10]. De la figura 10 podemos establecer que la celda con separación de electrodos de 1 mm, tiene en el set de corriente de 30A un porcentaje mayor de generación de hidrogeno de aproximadamente un 36.44% a la celda de 3mm de separación de electrodos, porque al tomar el máximo valor del caudal generado por la celda con separación de electrodos de 3 mm, el cual fue de $0.0260 \text{ Nm}^3/h$ y compararlo con el valor de la celda con separación de electrodos de 1mm cuyo valor fue de $0.0409 \text{ Nm}^3/h$, observamos un incremento en la generación de más de un tercio de la máxima capacidad de caudal generado por la celda de 3 mm de separación de electrodos en el estudio base.

También podemos añadir que al haber desarrollado pruebas en los sets de corriente de 35 A, 40 A y 45 A, se documenta un porcentaje de generación del 60.61% mayor al antes registrado en el estudio base [10], al obtener un valor máximo en caudal de generación de hidrogeno de $0.0660 \text{ Nm}^3/\text{h}$ a una corriente aplicada de 45 A, con la celda de 1mm de separación entre electrodos, frente a los $0.0260 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de la celda de 3mm de separación entre electrodos.

Figura 23. Comparativa configuración de celdas (eficiencia vs. Corriente)



Fuente: Fuente propia

Encontramos también diferencias notables en el valor promedio de caudal de generación de hidrogeno durante las pruebas a las diferentes celdas, ya que la celda de 3 mm de separación de electrodos tiene un promedio de $0.0157 \text{ Nm}^3/\text{h}$ entre los sets de corriente de 5 A a 30 A, mientras

que la celda de 1mm de separación de electrodos tiene un valor promedio en el caudal de generación de hidrogeno de $0.0346 \text{ Nm}^3/h$ entre los sets de corriente de 5 A a 45 A.

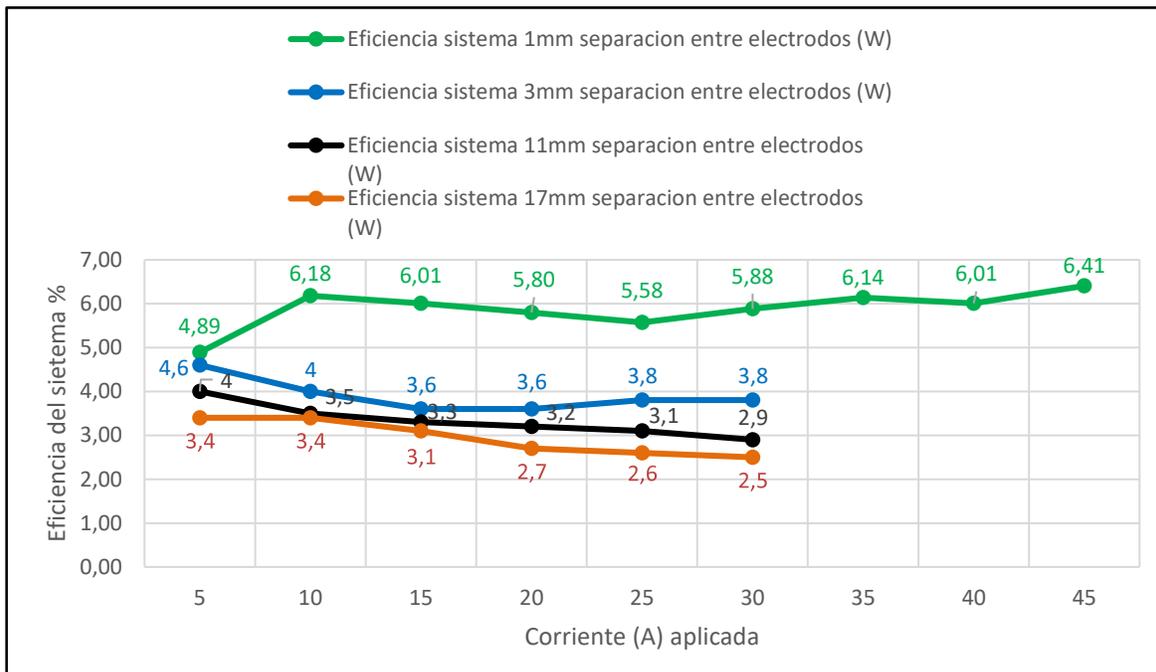
Las eficiencias de las celdas de 1 mm, 3 mm, 11 mm y 17 mm tienen diferentes comportamientos, como lo podemos observar en la figura 11. En las celdas de 1 mm y 3 mm de separación de electrodos podemos ver diferentes picos de eficiencia según el set de corriente aplicada. Como explicamos anteriormente en la sección de resultados de las pruebas, en la celda de 1 mm de separación entre electrodos podemos observar picos de rendimiento diferentes dependiendo del set de corriente aplicado en la prueba.

El promedio de eficiencia de la celda durante los nueve sets de corriente que se le aplicaron corresponde a un 45.2%. Para la celda de 3mm de separación entre electrodos tenemos también un comportamiento de diferentes picos de eficiencia, pero encontramos que el mayor valor de eficiencia es alcanzado en el set de corriente de 5 A, siendo este el set de corriente más bajo se obtiene un 31% de eficiencia de la celda.

El promedio de eficiencia para la celda de 3 mm de separación entre electrodos es de un 26%, entre los sets de corriente de 5 A a 30 A. Mientras que el comportamiento observado de las celdas de 11 mm y 17 mm de separación corresponde a un decremento gradual en la eficiencia a medida que aumentamos el valor de los sets de corriente de 5 A a 30 A.

Haciendo una comparativa de los datos de la figura 23, se refleja que la celda de 1 mm de separación entre electrodos tiene una eficiencia de 49.3% en su set de corriente más alto (45 A), en cambio la celda de 3mm de separación entre electrodos presenta un valor de eficiencia máximo de 31% en su set de corriente más bajo (5 A). Basándonos en los datos anteriores podemos afirmar que la celda de 1 mm de separación entre electrodos presenta un valor de 37.42% de eficiencia mayor a la celda de 3 mm de separación entre electrodos en el set de corriente donde se genera su mayor eficiencia.

Figura 24. Comparativa configuración de celdas (eficiencia sistema vs. Corriente)



Fuente: Fuente propia

En la figura 24 encontramos los datos sobre la eficiencia del sistema en las celdas de 1 mm, 3 mm y 17 mm. Podemos ver que el comportamiento de la celda de 1 mm se da por picos de eficiencia, teniendo su pico máximo en el set de corriente de 45 A con un valor de 6.41% y su pico mínimo de eficiencia se da en el set corriente de 5 A con un valor de 4.89%. Teniendo así que la celda de 1 mm de separación entre electrodos tiene un promedio de eficiencia con un valor de 5.87% entre los sets de corriente de 5 A a 45 A.

Por otra parte, las celdas de 3 mm, 11 mm y 17 mm presentan un comportamiento de decremento gradual, ya que su valor máximo de eficiencia se observa en el primer set de corriente aplicado (5 A).

El primer set de corriente aplicado a las celdas es el valor mínimo de corriente que se aplica a la celda. Para la celda de 3 mm de separación de electrodos el valor máximo de eficiencia del sistema es de 4.6% y viene decreciendo sucesivamente a medida que aumenta el valor del set de corriente hasta llegar al máximo valor de corriente aplicado (30 A), donde encontraremos el valor mínimo de eficiencia de estas tres configuraciones de celdas de electrolisis alcalina, que para

la celda de 3 mm registra un valor mínimo de eficiencia del sistema de 2.5% y cuyo valor promedio entre los sets de 5 A a 30 A, es de 3.9% de eficiencia del sistema.

Conclusiones

Diseñamos una celda de electrolisis alcalina con dimensiones de 200 mm x 200 mm y distancia entre electrodos de 1 mm, que al reducir la distancia entre electrodos de 3 mm a 1 mm presenta un incremento del 44,7 % de eficiencia al aplicarle una corriente de 30 A.

Para la construcción de la celda de electrolisis alcalina se emplearon láminas de acrílico transparente para poder observar su comportamiento interno. Elegimos acero inoxidable 316L para la fabricación de los electrodos, debido a las propiedades anticorrosivas del material y a su buena conducción de corriente. Se instalaron sellos de neopreno que permiten mantener la hermeticidad de la celda evitando fugas del electrolito KOH que circula dentro del sistema a una concentración del 40 %. También colocamos una membrana Techme-Zifron que mejora la capacidad de impedir que las moléculas de hidrogeno y oxigeno que han sido separadas en el proceso de electrolisis se vuelvan a mezclar.

Al finalizar el ensamble de los sistemas de suministro de energía, sistema de suministro de electrolito KOH, recolección de agentes (H_2O , H_2 y O) y medida de gases, se realizaron pruebas experimentales en el laboratorio de la empresa Tecnomedición, bajo condiciones de temperatura de alrededor de 23 grados centígrados y una presión promedio de 0.7488 atm en la ciudad de Bogotá.

Durante las pruebas experimentales se aplicaron unos valores de corriente 5 A, 10 A, 15 A, 20 A, 25 A, 30 A, 35 A, 40 A y 45 A con un voltaje de 12V. Este proyecto aumento el rango de corriente que fue aplicado a la celda con configuración de 3 mm estudiada en el artículo “Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen production at atmospheric pressure” [6], donde el valor de corriente máximo aplicado fue de 30 A y que genero una eficiencia de la celda de electrolisis del 25%, un caudal máximo de generación de hidrógeno de $0.0260 Nm^3/h$ y una eficiencia del sistema de generación de hidrógeno de 4,6%.

Se utilizaron los valores de 35 A, 40 A y 45 A, buscando observar si se mantenía la pendiente creciente de generación de hidrógeno en la celda con configuración de 1 mm de

separación entre electrodos. En la tabla 5 podemos observar los valores registrados durante las pruebas experimentales en el rango de corriente de 30 A a 45 A.

Tabla 6.

Evaluación celda de configuración de separación entre electrodos de 1 mm

Corriente (A)	Porcentaje eficiencia de la celda de electrolisis (%)	Caudal Nm^3/h	Porcentaje eficiencia del sistema de generación de hidrógeno (%)
35 A	47,2	0,0497	6,14
40 A	46,2	0,0556	6,01
45 A	49,2	0,0660	6,41

Fuente: Fuente propia

Después de analizar los valores registrados en la tabla 5 se puede determinar que el comportamiento en la eficiencia de la celda de electrolisis, el caudal en Nm^3/h de generación de hidrógeno y la eficiencia del sistema de generación de hidrógeno es ascendente a medida que se incrementa la corriente aplicada.

En el desarrollo de las pruebas también se observó que la eficiencia de la celda de electrolisis alcalina con configuración de 1 mm de separación entre electrodos fue de 45,2 %, en tanto que la celda con configuración de 3 mm de separación entre electrodos tuvo un 25% de eficiencia en el estudio base, estos valores muestran una mejora del 44,7 % en la eficiencia de la celda de electrolisis alcalina.

la rata de flujo de hidrogeno generado fue un 36.5 % ($0.0409 Nm^3/h$) mayor con respecto a la configuración de 3 mm de separación entre electrodos que registro un caudal máximo de generación de hidrogeno de $0.0260 Nm^3/h$ a una corriente aplica da de 30 A.

El porcentaje máximo de eficiencia del sistema de generación de hidrógeno para la celda con configuración de 1 mm de separación entre electrodos fue de 6.41%, mientras que la celda con configuración de 3 mm de separación entre electrodos registro un valor máximo de 4.6 %, lo que permite decir que la eficiencia del sistema de generación de hidrogeno aumento un 28.3%.

Con el estudio de las condiciones de operación, fabricación y los datos experimentales recolectados en este proyecto, queremos contribuir con información que ayude en el desarrollo de las energías renovables en Colombia. Ayudando en la búsqueda de hacer esta tecnología igual de rentable a la generación de energía con combustibles fósiles en un futuro próximo, y avanzar en su desarrollo para que pueda ser implementada por las industrias como combustible único o complementario.

Anexos

Prueba	Tiempo (seg)	Amp (A)	Caudal (m ³ /seg)	Caudal celda 1mm (Nm ³ /h)	Caudal celda 3mm (Nm ³ /h)	Caudal celda 11mm (Nm ³ /h)	Caudal celda 17mm (Nm ³ /h)
1	258	5	1,93798E-06	0,00566	0,0065	0,0051	0,0046
2	102	10	4,90196E-06	0,0143	0,0100	0,0087	0,0083
3	70	15	7,14286E-06	0,0209	0,0130	0,0120	0,0110
4	54	20	9,1954E-06	0,0269	0,0170	0,0150	0,0120
5	45	25	1,10497E-05	0,0323	0,0220	0,0170	0,0150
6	36	30	1,3986E-05	0,0409	0,0260	0,0190	0,0170
7	29	35	1,70213E-05	0,0497	0	0	0
8	26	40	1,90476E-05	0,0556	0	0	0
9	22	45	2,25989E-05	0,0660	0	0	0
Promedio Nm ³ /h				0,0235	0,0158	0,0128	0,0113

Energía consumida (W)	Eficiencia celda 1mm separacion entre electrodos (W)	Eficiencia celda 3mm separacion entre electrodos (W)	Eficiencia celda 11mm separacion entre electrodos (W)	Eficiencia celda 17mm separacion entre electrodos (W)
60	37,6	31	26	23
120	47,6	27	24	22
180	46,2	24	22	21
240	44,6	24	21	18
300	42,9	25	20	17
360	45,2	25	19	17
420	47,2	0	0	0
480	46,2	0	0	0
534	49,3	0	0	0
Promedio efic.	45,2	22,286	22	19,67

Energía consumida (W)	Eficiencia celda 1mm separación entre electrodos (W)	Eficiencia celda 3mm separación entre electrodos (W)	Eficiencia celda 11mm separación entre electrodos (W)	Eficiencia celda 17mm separación entre electrodos (W)
60	37,6	31	26	23
120	47,6	27	24	22
180	46,2	24	22	21
240	44,6	24	21	18
300	42,9	25	20	17
360	45,2	25	19	17
420	47,2	0	0	0
480	46,2	0	0	0
534	49,3	0	0	0
Promedio efíc.	45,2	22,286	22	19,67

KOH 40%		H2	0,0005	NORMA ISO 647 Sin Bomba				Energía ganada(W)
PRUEBA REALIZADA CON H2 NO REGULADA				TIEMPO (seg)				
PRUEBA	AMP (A)	VOL(V)	Potencia (W)	0.5L - Tiempo 1	0.5L - Tiempo 2	0.5L - Tiempo 3	0.5L - Tiempo 4	
1	5	12	60	258	253	265	256	22,57
2	10	12	120	104	99,5	102	102,5	57,08
3	15	12	180	72,5	71,5	70,5	65,5	83,17
4	20	12	240	56,5	50,5	54,5	56	107,07
5	25	12	300	48	44	48	41	128,66
6	30	12	360	37,5	36	35,5	34	162,85
7	35	12	420	28	30,5	30	29	198,20
8	40	12	480	26,5	27	25,5	26	221,79
9	44,5	12	534	22,5	21,5	22,5	22	263,14

A Aplicados	Nm ³ /h 1m	E.C 1mm	E.S 1mm
5A	0,00566	37,6	4,89
10A	0,00864	47,6	6,18
15A	0,0066	46,2	6,01
20A	0,006	44,6	5,8
25A	0,0054	42,9	5,58
30A	0,0086	45,2	5,88
35A	0,0088	47,2	6,14
40A	0,0059	46,2	6,01
45A	0,0104	49,3	6,41
% CD > 3mm	60,6	23,73	20,87
prom.	0,0073	45,2	5,88
% Nm ³ /h	70,51	62,88	71,76
Nm ³ /h 3mm	0,026		
% CD (0,0409)	36,43		
prom. 3mm	0,0130	31	

Referencias Bibliográficas

- [1] A. Aslani, M. Naaranoja, and K. F. V. Wong, “Strategic analysis of diffusion of renewable energy in the Nordic countries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 497–505, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.060.
- [2] A. C. Christiansen, “New renewable energy developments and the climate change issue: A case study of Norwegian politics,” *Energy Policy*, vol. 30, no. 3, pp. 235–243, 2002, doi: 10.1016/S0301-4215(01)00088-X.
- [3] A. Lache Muñoz, “Producción de hidrógeno a partir de energía solar. Panorama en Colombia Hydrogen Production from Solar Energy. The Overview in Colombia,” pp. 95–111, 2015, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5179412>
- [4] A. P. Priego and Á. A. Vargas, “Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de hidrógeno,” *Esc. Técnica Super. Ing. Sevilla*, 2009.
- [5] J. Chi and H. Yu, “Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production,” *Cuihua Xuebao/Chinese J. Catal.*, vol. 39, no. 3, pp. 390–394, 2018, doi: 10.1016/S1872-2067(17)62949-8.
- [6] Congreso de Colombia, “Ley 2099,” no. 2099, pp. 1–25, 2021.

[1] A. Aslani, M. Naaranoja, and K. F. V. Wong, “Strategic analysis of diffusion of renewable energy in the Nordic countries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 497–505, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.060.

[2] A. C. Christiansen, “New renewable energy developments and the climate change issue: A case study of Norwegian politics,” *Energy Policy*, vol. 30, no. 3, pp. 235–243, 2002, doi: 10.1016/S0301-4215(01)00088-X.

[3] A. Lache Muñoz, “Producción de hidrógeno a partir de energía solar. Panorama en Colombia Hydrogen Production from Solar Energy. The Overview in Colombia,” pp. 95–111, 2015, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5179412>

- [4] A. P. Priego and Á. A. Vargas, “Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de hidrógeno,” *Esc. Técnica Super. Ing. Sevilla*, 2009.
- [5] J. Chi and H. Yu, “Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production,” *Cuihua Xuebao/Chinese J. Catal.*, vol. 39, no. 3, pp. 390–394, 2018, doi: 10.1016/S1872-2067(17)62949-8.
- [6] Congreso de Colombia, “Ley 2099,” no. 2099, pp. 1–25, 2021.
- [7] M. David, C. Ocampo-Martínez, and R. Sánchez-Peña, “Advances in alkaline water electrolyzers: A review,” *J. Energy Storage*, vol. 23, no. August 2018, pp. 392–403, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.03.001.
- [8] D. D. A. de Fátima Palhares, L. G. M. Vieira, and J. J. R. Damasceno, “Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 9, pp. 4265–4275, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.051.
- [9] I. Dincer and C. Acar, “Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 34, pp. 11094–11111, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.035.
- [10] J. Barco-Burgos, U. Eicker, N. Saldaña-Robles, A. L. Saldaña-Robles, and V. Alcántar-Camarena, “Thermal characterization of an alkaline electrolysis cell for hydrogen production at atmospheric pressure,” *Fuel*, vol. 276, no. May, p. 117910, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117910.

[11] M. M. El-Kassaby, Y. A. Eldrainy, M. E. Khidr, and K. I. Khidr, “Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 1, pp. 243–251, 2016, doi: 10.1016/j.aej.2015.10.016.

[12] M. Pardo Buendía, “El impacto social del cambio climático,” *Panor. Soc.*, no. 5, pp. 22–35, 2007.

[13] M. I. Aydin and I. Dincer, “An assessment study on various clean hydrogen production methods,” *Energy*, vol. 245, p. 123090, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.123090.

[14] O. Castiblanco and D. J. Cárdenas, “Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión,” *Gestión y Ambient.*, vol. 23, no. 2, pp. 299–311, 2020, doi: 10.15446/ga.v23n2.86466.

[15] S. Di Pietro, “Acuerdo de París,” *Coop. Desarro.*, vol. 25, no. 111, 2017, doi: 10.16925/co.v25i111.1874.

[16] R. Fernández-Reyes, “El Acuerdo de París y el cambio transformacional,” *Papeles Relac. ecosociales y cambio Glob.*, vol. 132, pp. 101–114, 2016, [Online]. Available: http://sciencepolicy.colorado.edu/media_coverage

[17] S. Atilhan, S. Park, M. M. El-Halwagi, M. Atilhan, M. Moore, and R. B. Nielsen, “Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry,” *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 31, p. 100668, 2021, doi: 10.1016/j.coche.2020.100668.

[18] J. Töpler and J. Lehmann, *BOOOOOOK: Hydrogen and Fuel*. 2016.

[19] F. I. Gallardo, A. Monforti Ferrario, M. Lamagna, E. Bocci, D. Astiaso Garcia, and T. E. Baeza-Jeria, “A Techno-Economic Analysis of solar hydrogen production by electrolysis in the north of Chile and the case of exportation from Atacama Desert to Japan,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 26, pp. 13709–13728, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.07.050.

[20] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, “ANEXO : PROMEDIOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN GLOBAL MEDIA RECIBIDA EN SUPERFICIE PARA LAS PRINCIPALES CIUDADES DEL PAÍS (Wh / m² POR DÍA),” 2019. [Online]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Anexo-Promedios-mensuales-de-Irradiacion-Global-Media.pdf>

[21] U. Lee, S. Jeon, and I. Lee, “Design for shared autonomous vehicle (SAV) system employing electrified vehicles : Comparison of battery electric vehicles (BEVs) and fuel cell electric vehicles (FCEVs),” *Clean. Eng. Technol.*, vol. 8, no. May, p. 100505, 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100505.

[22] “En Colombia.,” *Campo Elías Romero Fuenmayor*, pp. 298–306, 2022, doi: 10.2307/j.ctv287sbqv.115.

[23] D. O. No, D. O. No, B. Por, and S. Energ, “Artículo,” no. 51990, pp. 1–19, 2022.

[24] IRENA, *Geopolitics of the energy transformation: the hydrogen factor*. 2022.

[25] Bloomberg NEF, “Hydrogen Economy Outlook,” *Bloom. New Energy Financ.*, p. 12, 2020, [Online]. Available: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>

[26] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, “Atlas de Radiación Solar de Colombia,” 2005. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21129/3-+Brillo+Solar.pdf/00c38815-74d0-4b1e-bfc4-ed842d466788>.