

Construcción de una celda para la producción de hidrogeno verde mediante el proceso de
electrolisis.

Santiago Felipe Benavides Bastidas

Daniel Felipe Medina Rondón

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2024

Construcción de una celda para la producción de hidrogeno verde mediante el proceso de
electrolisis.

Santiago Felipe Benavides Bastidas

Daniel Felipe Medina Rondón

Proyecto de Trabajo de grado presentado al Comité Curricular del Programa de Ingeniería
Electrónica para optar por el título de Ingeniera Electrónica.

Asesor

PhD. Edgar Alberto Unigarro Calpa

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2024

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité Curricular en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad CESMAG para optar al título de Ingeniero Electrónico

Edgar Alberto Unigarro Calpa

Asesor

Geny Alejandra Mera Córdoba

Jurado

Carlos Andrés Criollo Paredes

Jurado

Página de nota de exclusión de responsabilidad intelectual

“El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusivamente responsabilidad de su autor y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG”

Dedicatoria

Esta dedicatoria, en primer lugar, está dirigida a Dios y a la Virgen, a quienes agradezco por brindarme bienestar, sabiduría y la tranquilidad necesaria para realizar este proyecto.

Llegar hasta este momento repleto de aprendizajes, desafíos y emociones, he llegado gracias a mi valentía para enfrentar retos que en algún momento dudé poder superar. Agradezco a mis profesores quienes me brindaron su conocimiento y también enseñanzas que me servirán en mi día a día, entre ellos principalmente a mi asesor Edgar Unigarro por su confianza y ser parte fundamental para lograr este proyecto, gracias por enseñarme a ver soluciones.

A mi madre gracias por ese amor incondicional y por ser mi mayor apoyo en todo. Gracias por nunca dejar de creer en mí, por impulsar mi crecimiento y por acompañarme en cada paso del camino. Sé que no fue fácil, pero juntos lo logramos.

A mi hermana, gracias por enseñarme que ningún sueño es tan lejos para poder lograrlo, gracias por ser mi ejemplo de fortaleza y por hacerme saber que siempre seremos los dos.

A mi padre gracias por formar parte de este proceso. Su apoyo en cada paso que doy en la búsqueda de mejorar como persona y profesional ha sido muy importante. Agradezco profundamente sus enseñanzas.

A mi novia, que fue parte vital de este proceso. Gracias por brindarme un amor y apoyo tan incondicionales, gracias por creer en mí.

Y finalmente, pero no menos importante, quiero dirigirme a mis amados papitos. Les agradezco de todo corazón por todo lo que han hecho por mí. Hoy doy gracias a Dios por permitirme en vida darles esta alegría. No encuentro palabras suficientes para expresar cuánto los amo y cuánto significan para mí. Este momento, hoy, es en honor y gratitud hacia ustedes.

Santiago Felipe Benavides Bastidas.

Dedicatoria

Este trabajo de grado es el producto de un camino lleno de aprendizaje, desafíos y crecimiento personal, y no habría sido posible sin el apoyo incondicional de aquellos que han estado a mi lado en este recorrido. En primer lugar, quiero dedicar este trabajo a mis padres, cuyo constante sacrificio han sido mi apoyo fundamental durante todos estos años. Su dedicación incansable me ha inspirado a alcanzar nuevas alturas y a no rendirme ante las adversidades.

A mi familia, por su comprensión, paciencia y por celebrar cada uno de mis logros como si fueran los suyos propios. Su amor incondicional ha sido mi refugio en los momentos difíciles y mi mayor alegría en los momentos de triunfo. También quiero expresar mi gratitud a mis compañeros, quienes han sido mi red de apoyo emocional. A mis profesores y mentores, les debo un profundo agradecimiento por su orientación experta, su sabiduría y su dedicación a mi crecimiento académico y profesional. Sus enseñanzas han sido una fuente constante de inspiración y me han ayudado a desarrollar las habilidades y el conocimiento necesarios para completar este trabajo con éxito.

Por último, pero no menos importante, agradezco a todas las personas que, de una forma u otra, han contribuido a mi formación y a la realización de este proyecto. Cada consejo y cada experiencia compartida han dejado una huella imborrable en mi camino hacia la excelencia académica.

Este trabajo es un tributo al apoyo y la confianza que han depositado en mí. Que esta dedicación refleje mi profunda gratitud hacia todos aquellos que han sido parte de mi viaje universitario y que han hecho posible este logro. Gracias.

Daniel Felipe Medina Rondón.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	7
Lista de Figuras	11
Lista de Tablas	12
Introducción	13
1. El Problema de Investigación	15
1.1 Objeto o tema de investigación	15
1.2 Líneas de investigación: Potencia y energía.	15
1.3 Sub-línea de investigación: Energías alternativas.....	15
1.4 Descripción del Problema:	16
1.5 Formulación del problema	17
1.6 Objetivos	17
1.6.1 Objetivo general	17
1.6.2 Objetivos específicos.....	17
1.7 Justificación.....	18
1.8 Viabilidad	20
1.9 Delimitación del problema	20
2. Tópicos del Marco Teórico.....	21
2.1 Antecedentes	21

2.1.1	Métodos de producción de hidrogeno	21
2.1.2	Desarrollo de un prototipo para la producción de Hidrógeno a partir de electrolisis	24
2.1.3	Análisis del costo de producción del hidrógeno verde en la zona del caribe colombiano, una aplicación al sector Industrial.....	26
2.1.4	Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua	27
2.2	Enunciados de los supuestos teóricos.....	30
2.2.1	Electrolisis	30
2.2.2	Celda de hidrogeno.....	31
2.2.3	Energía del Hidrógeno.....	32
2.2.4	Métodos de obtención de hidrogeno	35
2.3	Definición de conceptos	35
2.3.1	Definición nominal de variables.....	35
2.4	Hipótesis.....	36
2.4.1	Hipótesis de Investigación.....	36
2.4.2	Hipótesis nula	36
2.4.3	Hipótesis alternativa	36
3.	Metodología	37
3.1	Enfoque	37

3.2	Paradigma.....	37
3.3	Método	37
3.4	Tipo de Investigación	38
3.5	Diseño de Investigación	38
3.6	Universo	39
3.7	Muestra.....	39
3.8	Técnicas de Recolección de Información.....	39
3.9	Validez de la técnica	40
3.9.1	Confiabilidad de la técnica	40
3.9.2	Instrumentos de recolección de información.....	40
4.	Resultados de la investigación	41
4.1	Objetivo 1. Diseñar una estructura, sistema eléctrico y esquema de producción para hidrogeno verde.....	41
4.2	Objetivo 2. Diferenciar parámetros de funcionamiento de la celda que influyen en la obtención de hidrogeno.....	43
4.3	Objetivo 3. Comparar configuraciones de la celda para ver cuál es la más eficiente y económica.44	
4.4	Objetivo 4. Caracterizar la producción de hidrogeno de las celdas al realizar el proceso de electrolisis.	52
5.	Análisis y discusión de resultados	71
5.1	Comparación de electrolito con respecto a la electro conductividad.	71

5.2 Saturación del electrolito dependiendo de su concentración.	72
5.3 Evaluación de las diferentes eficiencias con respecto al electrolito.....	73
Conclusiones	75
Recomendaciones.....	77
Trabajos futuros	78
Referencias	79

Lista de Figuras

Figura 1 Tipos de hidrogeno.	24
Figura 2 Diagrama de la cadena de valor del hidrógeno verde. (Vargas, 2021).....	27
Figura 3 Diagrama esquemático de una celda de electrólisis PEM. (Vargas, 2021)	27
Figura 4 Recipiente utilizado para electrolisis.	41
Figura 5 Forma de electrodos para celda de electrolisis.	42
Figura 6 Diseño de estructura de celda de electrolisis.	43
Figura 7 Electrodo negativos, neutros y positivos respectivamente.	45
Figura 8 Electroconductividad de NaOH vs tiempo.	47
Figura 9 Voltaje (V) y Corriente (A).	50
Figura 10 Electroconductividad de la celda de electrolisis a diferentes cantidades de electrolito	52
Figura 11 Cristal de la celda después de pruebas realizadas.....	55
Figura 12 Electrodo después de pruebas realizadas.	56
Figura 13 Electro conductividad del Cloruro de Sodio (NaCl) como electrolito.	57
Figura 14 Cristal de la celda después de pruebas con NaCl.	57
Figura 15 Electrodo de la celda después de pruebas con NaCl.	58
Figura 16 Comparación de electroconductividad entre NaOH y NaCl.	59
Figura 17 Comparación de electro conductividad entre NaOH y NaCl	72

Lista de Tablas

Tabla 1 Eficiencia eléctrica y térmica para corrientes cercanas a 8,6 A. (Vermeersch, 2018)	29
Tabla 2 Eficiencia eléctrica y térmica para corrientes cercanas a 3,2 A. (Vermeersch, 2018)	30
Tabla 3 Media y desviación estándar para los diferentes tipos de eficiencia. (Vermeersch, 2018).	30
Tabla 4 Pruebas realizadas de electro conductividad con diferentes cantidades de electrolito (g).	46
Tabla 5 Conductividad del electrolito.	48
Tabla 6 Voltaje vs Corriente ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 7 Electroconductividad del Cloruro de Sodio <i>NaOH</i>	51

Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, diversas problemáticas han surgido y requerido nuestra atención como sociedad y es nuestra responsabilidad reflexionar al respecto. En particular, la contaminación ambiental y el cambio climático destacan como áreas que demandan una acción inmediata en nuestro modelo energético. Esta razón permite el paso a nuevas energías que contribuyan al mejoramiento de dicha cuestión. Entre ellas encontramos las energías renovables, limpias e inagotables que se convierten en la clave para un futuro más sostenible. Específicamente, el hidrógeno es una materia prima vital utilizada en industrias como la síntesis de amoníaco para fertilizantes, la reducción metalúrgica para la refinación del acero y en el procesamiento de petróleo crudo (Miller et al., 2020). De ahí que se considere un combustible esperanzador, y al que se está dedicando un gran esfuerzo investigativo, debido a las ventajas provenientes de sus propiedades físicas y químicas, ya que, por ejemplo, inducido en baterías de combustible, puede transformar su energía química en energía eléctrica utilizable en industria, servicios generales y el transporte.

Sin embargo, el hidrógeno no es un combustible común, puesto que, por una parte, tiene unas propiedades físicas y químicas bastante diferenciadas de los demás. Y por otra, no es un recurso natural, es decir, no se encuentra de forma aislada en la naturaleza, sino combinado con otros compuestos, como los hidrocarburos o el agua (Yolanda & Soria, 2006). Ahora bien, al estar unido a otros elementos, se vuelve necesario optar por procesos que permitan el acceso a este de manera pura. No obstante, los métodos comunes para obtenerlo de manera pura provocan importantes emisiones de CO_2 (Venegas et al., 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario encontrar una manera de separar dichos componentes que se encuentran unidos con el hidrogeno y así poder hacer uso de este de una

manera pura. Con esto en mente, la electrólisis del agua es una tecnología madura bien establecida que se utiliza en aplicaciones especiales. Lo que se quisiera en un contorno ideal es tener cómo alimentar estos procesos con energías renovables para disminuir la contaminación de carbono generada actualmente. (Miller et al., 2020). Es así que el propósito del presente proyecto de grado pretende construir una celda que permita la producción de hidrógeno verde, haciendo uso de la electrólisis con el fin de contrarrestar los métodos contaminantes comunes en el mercado.

1. El Problema de Investigación

1.1 Objeto o tema de investigación

Producción de hidrógeno (H)

1.2 Líneas de investigación: Potencia y energía.

El área de Potencia y Energía del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad CESMAG enfoca su trabajo en el estudio de la generación, transformación, intercambio, transporte, distribución, almacenamiento y consumo de energía eléctrica de manera absoluta o por unidad de tiempo, incluyendo el diseño, análisis, control y optimización de sistemas de electrónica de potencia. Las líneas de investigación incluyen Calidad de la Energía y Energías Alternativas. (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015)

1.3 Sub-línea de investigación: Energías alternativas.

Las energías alternativas son aquellas que se obtienen mediante procesos alternativos a los tradicionales (quema de combustibles fósiles o, en el caso de Colombia, la hidroeléctrica a gran escala), estas se dividen en renovables o limpias, las cuales se obtienen de fuentes naturales capaces de regenerarse de manera más rápida de lo que se consumen o ser virtualmente infinitas; y en no renovables cuya fuente se consume más rápido de lo que se regenera pero que a diferencia las fuentes tradicionales el impacto ambiental es menor (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015).

1.4 Descripción del Problema:

El hidrogeno es un recurso presente en gran cantidad en el planeta tierra. No obstante, se evidencian dos factores muy importantes; el primero hace referencia a los actuales procesos de extracción, Sin embargo, sus procesos de obtención pueden llegar a ser muy contaminantes (Kazimierski, 2021) Actualmente la principal dificultad para la producción de hidrógeno es la fuente o materia prima desde la cual se obtiene, cerca del 96% proviene de fuentes no renovables como el gas natural, petróleo y carbón, y sólo un 4% proviene de fuentes renovables o limpias (Castiblanco & Cárdenas, 2020) y, el segundo, a su falta de aprovechamiento ya que el hidrógeno está combinado en su mayor parte formando agua, no hay hidrógeno libre y la corteza terrestre está formada principalmente por oxígeno, silicio, aluminio y otros elementos menores (Hidrógeno & Futuro, 1968). Al continuar con los procesos actuales no se contrarresta la contaminación en el planeta. Por ello, se recurre al proceso de electrólisis, en el cual el hidrogeno se convierte en una alternativa verde.

El hidrógeno se puede obtener de varias formas por lo que se categoriza al tipo de hidrógeno por la contaminación que esta obtención produce por lo que se identifica el hidrógeno negro, gris, marrón, azul y verde siendo el verde más amigo del medio ambiente.

Teniendo en cuenta lo anterior se explica por qué las formas de obtener el hidrógeno son muy importantes, por lo que la obtención de hidrógeno azul, se extrae a partir de combustibles fósiles, especialmente por la descomposición del metano (CH_4), lo cual genera producción de CO_2 , siendo un proceso insostenible a nivel ambiental (Castellanos et al., 2022).

Finalmente, el hidrógeno negro o marrón se obtiene también de fuentes fósiles luego de la gasificación del carbón, por la misma línea se encuentra el hidrógeno gris, extraído de la reformación de metano por vapor a partir del gas natural, en ninguno de estos procesos se

implementarán procesos de captura de emisiones contaminantes, siendo el tipo de hidrógeno más contaminante y a su vez, el que requiere de menos dinero y recursos, por tal razón representan el 70% de la producción de hidrógeno actualmente (Castellanos et al., 2022).

Teniendo en cuenta esta información, se observa que las maneras actuales y más utilizadas de obtener hidrógeno deben tener materia prima más difícil de procesar y con residuos, causas de la obtención demasiado contaminantes e insostenibles a nivel ambiental. Por esto se busca una manera de obtención mucho más amigable con el medio ambiente y con materiales que se puedan procesar de manera más sencilla y menos contaminante.

1.5 Formulación del problema

¿Es posible adaptar una celda de electrolisis para producir hidrógeno de manera eficiente empleando insumos de bajo costo y de uso cotidiano?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Construir una celda para la producción de hidrógeno verde mediante el proceso de electrolisis fabricada con materiales disponibles en Colombia.

1.6.2 Objetivos específicos

- Diseñar una estructura, sistema eléctrico y esquema de producción para hidrógeno verde.
- Diferenciar parámetros de funcionamiento de la celda que influyen en la obtención de hidrógeno.
- Comparar configuraciones de la celda para ver cuál es la más eficiente y económica.
- Caracterizar la producción de hidrógeno de las celdas al realizar el proceso de electrolisis.

1.7 Justificación

La demanda mundial de hidrógeno alcanzó las 94 Mt en 2021, un 5% más que la demanda de 2020. La producción actual de hidrógeno, utilizada principalmente en los sectores químico y petroquímico, es responsable de más de 900 Mt de emisiones de CO₂; cambiar esos sectores al uso de hidrógeno de bajas emisiones es una prioridad. Reemplazar el hidrógeno basado en combustibles fósiles sin disminuir, con hidrógeno de baja emisión, en estas aplicaciones presenta desafíos técnicos relativamente bajos, ya que es una sustitución similar en lugar de un cambio de combustible (IEA, 2022).

Con el fin de obtener el mayor beneficio del hidrógeno, el presente trabajo de grado se enfoca en determinar procedimientos que permitan la extracción eficiente y cero contaminantes. El resultado de esto permitirá obtener hidrógeno verde para abrir paso a nuevas líneas de investigación sobre la aplicación y beneficio de este. Poner en marcha estas nuevas tecnologías de extracción es muy importante ya que la demanda de hidrógeno alcanza alrededor de 180 Mt, y casi la mitad de esa demanda proviene de nuevas aplicaciones, particularmente en la industria pesada, la generación de energía y la producción de combustibles a base de hidrógeno.

Se opta por un hidrógeno renovable, conocido como hidrógeno verde, el cual se obtiene mediante la electrólisis del agua que no genera emisiones contaminantes, ya que el residuo generado es vapor de agua como producto de la combustión.

El hidrógeno que se obtiene de este proceso puede ser utilizado en diferentes partes para generar electricidad, por ejemplo, en pilas y/o en celdas, inyectarse en la red de gas y usarse asimismo en el transporte, la industria o los sectores residencial y comercial (Gimenez, 2019).

Por lo tanto, es ahora donde se debe poner en marcha tecnologías que ayuden a reducir las problemáticas de este proceso, ya que una de ellas es el costo elevado y al reducirlo hace que el hidrógeno se convierta en la alternativa de mayor uso.

Teniendo en cuenta el gran avance tecnológico que vivimos se puede encontrar con gran facilidad elementos que hagan posible obtener hidrogeno mediante la electrolisis de una manera más económica ya que permite producir, almacenar, transportar y utilizarlo de diferentes formas.

El uso de hidrógeno como combustible está experimentando un crecimiento muy grande que podría ser la base para aprovechar su enorme beneficio como energía limpia. Para ello, la Agencia Internacional de Energía (AIE) da la oportunidad para ejecutar proyectos ambiciosos y hacerlos realidad.

Tradicionalmente, las celdas de producción de hidrogeno se han construido en pequeñas escalas, pero se espera que el aumento en los volúmenes de producción y el crecimiento asociado a reducir los costos de inversión para todas las tecnologías de celdas. La electrolisis para la producción de hidrógeno verde es una de las soluciones más prometedoras para sustituir los combustibles fósiles y reducir las emisiones contaminantes

El hidrógeno en la actualidad se utiliza principalmente en refinerías de petróleo y en la producción de fertilizantes, pero su uso debería ampliarse a otros sectores como el transporte, la climatización de edificios o la propia generación de energía (Gimenez, 2019).

Además, la seguridad energética puede alcanzarse aprovechando las fuentes de energía y su perspectiva es hacer este tipo de hidrogeno verde con materiales locales disponibles para la producción y uso final del hidrógeno. Cuando se disponga de materiales para la construcción de celdas para producir hidrógeno verde se podrá a escalar y habrá una evolución más rápida en

comparación con los otros métodos de extracción contaminante y las energías renovables para una mejor sostenibilidad.

La producción de bajas emisiones representó menos del 1% de la producción total de hidrógeno en los últimos tres años. En 2021 la producción de hidrógeno de bajas emisiones creció un 9%, reflejando el crecimiento de los proyectos de puesta en marcha. (IEA, 2022)

1.8 Viabilidad

Teniendo en cuenta los aspectos de nuestro entorno optamos por realizar este proyecto, ya que es posible encontrar materiales para la construcción a nivel local, además de realizar la implementación en un laboratorio, con esperanza a escalar un nivel más avanzado o de mayor producción, Esta estrategia aborda efectivamente el desafío del alto costo de producción asociado con la obtención de hidrógeno verde Asimismo, abre las puertas a investigaciones adicionales sobre mejoras, aplicaciones, almacenamiento y/o transporte del hidrógeno en la universidad CESMAG o en las demás universidades del departamento.

1.9 Delimitación del problema

Este proyecto será abordado con los cálculos y análisis de los prototipos de electrodo, ingeniería básica para el diseño de la celda de producción de hidrogeno y los estanques y/o contenedores de hidrogeno, pruebas necesarias y mediciones que permitan cuantificar la eficiencia de la celda y la cantidad de producción de hidrógeno. Este proceso se llevará a cabo en el laboratorio ubicado en la universidad CESMAG ya que se tiene a la mano los equipos que se requieren para sacar adelante el proyecto además que al ser un gas su manejo debe tener un cuidado especial.

2. Tópicos del Marco Teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 *Métodos de producción de hidrogeno*

Como se ha comentado previamente, para la obtención de hidrógeno se necesitan realizar procesos de separación puesto que se encuentra inmerso en la naturaleza, es necesario obtenerlo de materias primas u otros elementos que tengan presente el hidrogeno en su estructura, pero en la actualidad no debería ser un problema ya que existen diferentes métodos para su extracción. Actualmente, a nivel mundial se dice que se produce, más o menos, 41 millones de toneladas de hidrogeno en las diferentes formas de producción; ya sea con emisiones, bajas emisiones o totalmente cero (Kilner, 2022).

El hidrógeno, se presenta en la atmosfera en su estado gaseoso y mayormente en combinación con otros elementos formando otros compuestos, como hidrocarburos, entre ellos el metano (CH_4), que combinado con el oxígeno formando agua (H_2O), o utilizando a ambos como son carbohidratos. Además, el hidrógeno se ha establecido como materia esencial en procesos industriales, algo que ha tenido aumento en los últimos años. Por parte del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), se establece que el hidrógeno hace parte del 75% de la masa del universo y un 90% en el número de átomos (Herradón, 2011).

Al conocerse que el hidrógeno en su estado gaseoso no presenta ningún color, se ha optado por acompañarlo con diferentes tonos de color para así especificar la procedencia de su extracción. En este orden de ideas, hay 3 divisiones que clasifican el hidrogeno según su emisión; en ellas se encuentran diferentes tonalidades de hidrógenos como se explicó anteriormente.

En la actualidad principalmente se hace énfasis a producciones que no generan emisión tales como hidrogeno **blanco** e hidrogeno **verde**, donde de él se deriva el hidrogeno **amarillo**; la

ventaja de estos hidrógenos es que su emisión de CO_2 es nula, razón por la cual son amigables con el medio ambiente; el hidrogeno blanco, el cual no se tiene mucho conocimiento pero se ha adoptado un aserie de especulaciones por su procedencia; se dice que es un tipo de hidrógeno que se encuentra en la naturaleza, normalmente en forma gaseosa (H_2). En ocasiones se puede encontrar en depósitos subterráneos, pero son estudios que no tienen una validez estable por la cual aún es incierto si esto es una realidad. Por otra parte, se encuentra el hidrogeno verde, este se produce mediante la electrólisis, un proceso en el cual se utiliza electricidad para dividir el agua en oxígeno e hidrógeno, la producción de hidrógeno verde no genera emisiones directas de gases de efecto invernadero. Del hidrogeno verde podemos decir que existe un hidrogeno amarillo, el cual esta caracterizado por que se obtiene de la energía solar, además, según Empresa Nacional del Gas (ENAGAS), la cual es compañía de transporte de gas natural y Gestor Técnico del Sistema Gasista de España, el hidrogeno amarillo también se caracteriza por la utilización de fuentes de energía mixtas tales como renovables o combustibles fósiles, pero sin generar emisión de contaminantes. Esto los distingue de formas de hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles, como el hidrógeno gris y sus relacionados (Kilner, 2022).

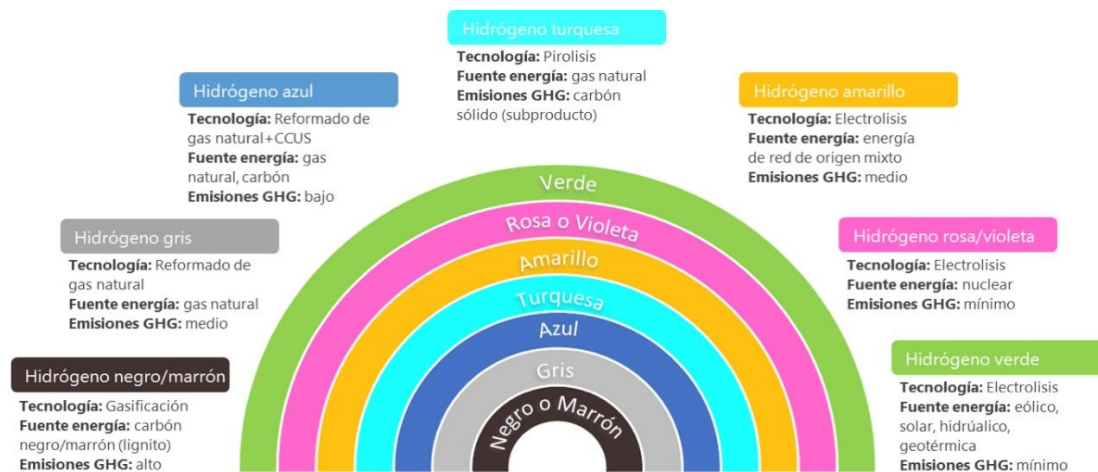
La segunda división son aquellas clases de producción que generan baja cantidad de emisiones de CO_2 , con esto se quiere decir que estas producciones almacenan o encapsulan CO_2 o en casos específicos, son nulas las emisiones en la finalización del proceso; en este grupo encontramos al hidrogeno **rosado** el cual está directamente relacionado con la energía nuclear, este tipo de hidrogeno es muy similar al hidrogeno verde, ya que la única diferencia es que la fuente de energía es de clase nuclear, además de que su emisión se caracteriza porque es nula. Otro tipo de hidrogeno es el **ámbar**, que está directamente relacionado con el hidrogeno naranja el cual se produce a partir de residuos no biodegradables, pero, la producción de hidrogeno naranja genera

emisiones contaminantes, razón por la cual capturar y de igual forma almacenar las emisiones de CO_2 , se denomina hidrogeno **ámbar**. En conjunto con el hidrogeno ámbar viene el **azul**, el cual se relaciona con este por la captura de emisiones, pero su fuente de producción es el gas natural utilizado a través de un proceso de reformado de gas. Para finalizar este grupo se encuentra el hidrogeno **turquesa**, el cual no es muy reconocido por su forma de obtención; el pirólisis a partir de hidrocarburos ligeros como el metano o el biogás, pero esta producción no almacena el CO_2 obtenido después del proceso, sino que lo solidifica.

Por último, se encuentran los colores que, si bien son los más comunes, son aquellos que generan mayor emisión de CO_2 , pues estos no lo almacenan sino que, por el contrario, lo liberan al ambiente, generando contaminación y un impacto negativo. En este momento hay diversas similitudes con procesos de obtención de hidrógeno de la segunda división, que son procesos que utilizan como fuente de producción materias primas ricas en hidrocarburos, como gas metano, carbón u otros combustibles fósiles, estos son el hidrogeno **negro**, **gris** y **café**, pero como se explicó anteriormente, no tienen ningún tipo de almacenamiento de las emisiones ni mucho menos se utilizan energías renovables.

El hidrogeno **naranja** que es producido a partir de residuos no biodegradables, los cuales generan un impacto negativo al medio ambiente tales como su incineración o en el almacenamiento en depósitos; estos residuos son utilizados para producir hidrogeno, pero si bien, se utiliza estos residuos para no generar un impacto dañino hacia el medio ambiente, los residuos generados del proceso no son encapsulados y se librea al ambiente, razón por la cual como se mencionó en el hidrogeno ámbar, se adiciona el proceso de almacenamiento al hidrogeno naranja para que se pueda considerar como amigable al medio ambiente.

Figura 1
Tipos de hidrogeno



Nota. Tomado de (Tecnicas Reunidas, 2022).

2.1.2 *Desarrollo de un prototipo para la producción de Hidrógeno a partir de electrolisis*

Según el estudio realizado por Mantilla et al., (2015) la electrolisis puede ser de tipo alcalina, tipo PEM que es la membrana de intercambio de protones, o de oxido sólido, siendo la electrolisis alcalina la más utilizada por su pureza de 99.8%. Además, la implementación de electrodos hechos de acero inoxidable, que es muy recomendable ya que a comparación de otros tipos de electrodos son de materiales de difícil acceso, en este caso para el cátodo que es el encargado de atraer al oxígeno se puede utilizar elementos tales como óxidos como espinelas o ferritas, aleaciones de níquel o cobalto, compuestos metálicos o materiales aislados que son óxidos con características que los protejan de corrosión. Esto debido a que se encontraran sumergidos en agua con soluciones que aumenten la conductividad y la eficiencia del sistema. Ahora, de manera similar, el cátodo se encarga de conservar el hidrogeno ya separado del agua, donde los principales elementos son el níquel y el cobalto, por esta razón es bueno encontrar otro material que pueda cumplir este objetivo tal como lo es el acero inoxidable, pues como se ha explicado, no presentara corrosión afectando el trabajo del sistema; sin embargo, para su mejoría también es necesario hacer

una curación al elemento pasando por un proceso de pulido limpieza electrolítica para la eliminación de grasa, neutralización y activación con Níquel. Para la limpieza electrolítica se requiere de la misma electrólisis con una adición de jabón e Hidróxido de Potasio a 30 mA/cm por un tiempo de 3 minutos. Además, se realiza una neutralización con Ácido Clorhídrico en un 30% de concentración y activación con Níquel, para este proceso es necesario cloruro de níquel y ácido sulfúrico por un tiempo de 2 minutos a una corriente de 50 mA/cm² acompañado de un ánodo en versión de placa de Níquel metálico. Cabe aclarar que a mayor área de los electrodos, mejor será su funcionamiento pues favorece la circulación. Adicionalmente, es de resaltar que Mantilla et al., (2016) no llevo a cabo la curación del acero inoxidable al presentar dificultades para la limpieza y activación del acero para utilizarlos en electrodos con Níquel.

Una recomendación que Mantilla et al., (2015) presenta es la implementación de separadores entre ánodo y cátodo con el fin de no permitir el filtrado del hidrogeno hacia el oxígeno y que se produzca nuevamente agua al combinarse estos dos, para esto se utiliza material con porosidad mayor al 50% y que presente agujeros con un diámetro de no más de 10 μm que debe ser inferior al diámetro de las burbujas de gas de hidrogeno producidas por el sistema. Además, los electrolitos con características electroquímicas contribuyen al buen funcionamiento del prototipo, estas características tales como una buena conductividad eléctrica, la no descomposición química a la variación de voltaje y pH; el hidróxido de Potasio (KOH) o hidróxido de Sodio (NaOH) pueden ser una disolución húmeda que cumplen con esas características de funcionamiento.

Se resalta del autor el cálculo utilizado para encontrar la energía necesaria para el funcionamiento del sistema, esta viene dado por la siguiente formula:

$$V = V_t + V_a + V_c + V_r \quad (1)$$

Donde, V_t es el voltaje mínimo de descomposición teórico o la entalpia de disociación para cada mol del agua, también conocidas como la energía libre de Gibbs para formación de agua, V_a y V_c que es el sobrevoltaje del ánodo y cátodo respectivamente; y por último el V_r que es la caída de tensión debido a la resistencia óhmica del electrolito

El voltaje ideal para su funcionamiento es de 1.48 V cuando se le suministra a una celda con características y/o condiciones similares a la entalpia del agua (V_t) siendo esto lo ideal, que justamente no sucede o es muy improbable que pase, por esto es mejor decir que el voltaje para funcionamiento de la celda de electrolisis es de 12V.

Una medida de prevención es la implementación de un arresta llamas conectado de un soplete, el arresta llamas previene el paso de una llama producida por el soplete hacia el burbujeador el cual estará conectado a un recipiente cerrado el cual contiene agua, la idea es que el gas de hidrogeno burbujee por medio del agua para que no sea se fugue por otras zonas produciendo algún accidente.

Finalmente, los autores concluyen que la concentración de la solución de hidróxido de potasio óptima para el proceso es de 20% y la del hidróxido de sodio es del 15% para una temperatura promedio de 20°C siendo el hidróxido de potasio el elemento que tiene menor resistencia, sin dejar de lado que la hermeticidad en los recipientes es un aspecto de vital importancia para el correcto funcionamiento de estas celdas (Mantilla et al., 2015)

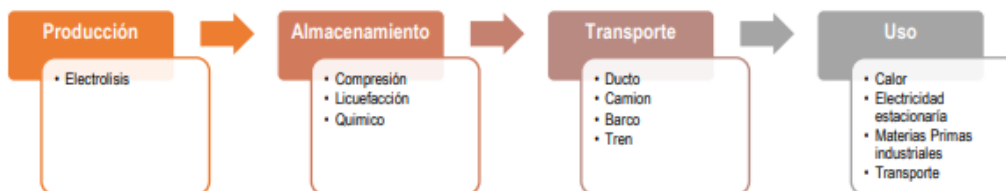
2.1.3 Análisis del costo de producción del hidrógeno verde en la zona del caribe colombiano, una aplicación al sector Industrial

El primer antecedente producido por Vargas (2021), se enfoca en el ámbito de la utilización de estas nuevas energías y el aprovechamiento de las mismas para muchos campos. En este se realiza un estudio a nivel local, cuyo objetivo es la descarbonización para el sector industrial en la

región, así permitir que Colombia tenga reducción de emisiones (GEI) propuesta el anterior año. Así mismo este estudio tiene diferentes ámbitos que se los denomina cadena de valor.

Figura 2

Diagrama de la cadena de valor.

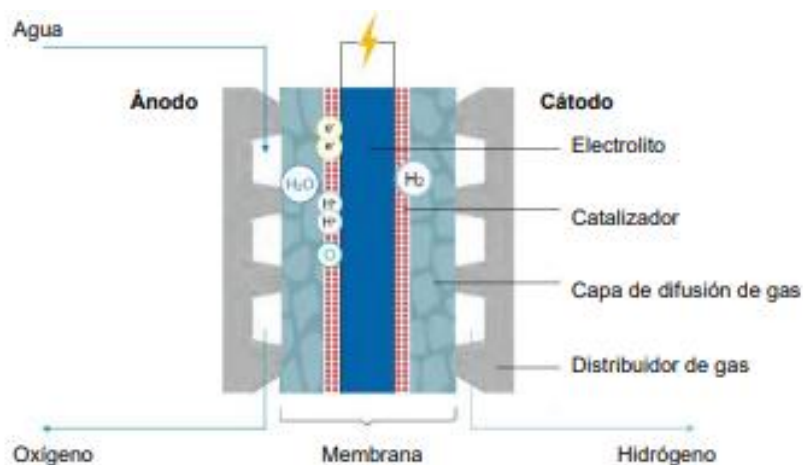


Nota. Tomado de Vargas, 2021.

El rumbo de este antecedente permite encontrar tecnologías que se utilizan para la extracción de hidrogeno verde las cuales se desarrollan mediante la Membrana de Intercambio de Protones (PEM, por sus siglas en ingles).

Figura 3

Diagrama esquemático de una celda de electrólisis PEM.



Nota. Tomado de Vargas, 2021.

2.1.4 Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua

En este antecedente elaborado por Vermeersch (2018) se propone un diseño para la construcción de una celda demostrativa de producción de hidrógeno a partir de la electrólisis de

agua potable. Teniendo en cuenta esto, se prosigue a diseñar e implementar un método que sea capaz de separar y almacenar el hidrógeno. Para que lo previo sea posible, es necesario estudiar y analizar diferentes factores que afectan el proceso, tales como propiedades físicas del elemento, la potencia en las salidas de la celda, la corriente que circula por esta y la cantidad de hidrógeno que se produce.

Este antecedente se direcciona a la realización de pruebas para saber la eficiencia de dichas celdas, un punto de estudio por el cual se realizan es saber el cociente entre la energía recuperada en el sistema que se pueda utilizar para la energía de utilización de producción. Así lo expresa los siguientes datos de la investigación

Uno de los primeros puntos importantes que se debe tener en cuenta es conocer algunas propiedades del elemento a trabajar, teniendo presente esto se observa algunas propiedades físicas del hidrogeno que más adelante van ayudan con el desarrollo del proyecto.

Las reacciones son llamadas reacción de evolución del oxígeno (OER: Oxigen Evolution Reaction) y reacción de evolución del hidrógeno (HER: Hydrogen Evolution Reaction) respectivamente. (Godula-Jopek, 2015)

Con estos datos se puede afirmar lo siguiente.

Menor que E° la electrólisis no se produce

Mayor que E° y menor que V° hay una reacción, pero no es la suficiente energía eléctrica.

Mayor que V° , hay la reacción y la potencia eléctrica va a ser capaz de mantener la temperatura del sistema.

En el antecedente mencionado se observa una experimentación en la cual se utiliza una eficiencia eléctrica para así obtener datos y poder compararlos.

La eficiencia eléctrica se determina utilizando la cantidad de energía que podría entregar 1 mol de hidrógeno, la cual sería la entalpía de disociación del agua que se menciona anteriormente

$$E_{hidrogeno} = 237,22 \text{ [kJ]}.$$

$$\text{Eficiencia electrica} = \frac{E_{hidrogeno}}{E_{utilizada}} \quad (2)$$

Se utiliza una fórmula de eficiencia eléctrica para obtener los siguientes datos.

- En la primera prueba se inyectan 3,2 [A] y 3,15 [V] en los bornes de la celda, en la cual se obtuvo una eficiencia eléctrica del 43,8% y una eficiencia térmica del 51,9%.

- En la segunda prueba se inyectan 8,7 [A] y 4,2 [V] en bornes de la celda, en la cual se obtuvo una eficiencia eléctrica del 33,4% y una eficiencia térmica del 39,6%

Para la construcción de esta celda se definen unos principios para que sea capaz de producir y almacenar el hidrógeno

En la implementación, después de realizar pruebas, es posible obtener diferentes datos que brindan una ayuda como punto de comparación en los que intervienen parámetros eléctricos y volumen de producción.

Tabla 1

Eficiencia eléctrica y térmica para corrientes cercanas a 8,6 A.

<i>I</i>	<i>U</i>	<i>Eficiencia eléctrica</i>	<i>Eficiencia térmica</i>
[A]	[V]	[%]	[%]
8,71	4,13		
8,65	4,13	31,7	37,5
8,61	4,13	34,4	40,8
8,59	4,13	33,5	39,8
8,59	4,16	34,4	40,8
8,58	4,16	33,3	39,5
8,56	4,18	33,5	39,7
8,58	4,19	33,9	40,2
8,58	4,21	33,6	39,8
8,56	4,22	33,3	39,5
8,58	4,23	33,6	39,9
8,60	4,23	33,2	39,3
8,64	4,24	33,2	39,4
8,65	4,24	33,0	39,1
8,69	4,24	32,7	38,7

Nota. Tomado de Vermeersch, 2018.

Tabla 2

Eficiencia eléctrica y térmica para corrientes cercanas a 3,2 A. (Vermeersch, 2018)

<i>I</i> [A]	<i>U</i> [V]	<i>Eficiencia eléctrica</i> [%]	<i>Eficiencia térmica</i> [%]
3,10	3,14		
3,11	3,14	48,2	57,2
3,11	3,14	43,4	51,5
3,09	3,15	45,1	53,5
3,11	3,15	45,8	54,4
3,11	3,15	44,4	52,6
3,12	3,14	45,0	53,3
3,13	3,14	44,7	53,0
3,14	3,14	44,5	52,8
3,20	3,14	43,2	51,2
3,26	3,13	42,1	49,9
3,22	3,13	42,1	49,9
3,17	3,13	42,1	50,0
3,2	3,13	41,4	49,1
3,18	3,13	40,8	48,4

Nota. Tomado de Vermeersch, 2018.

Los parámetros de diseño e implementación de este antecedente sirven como guía para próximas comparaciones.

Tabla 3

Media y desviación estándar para los diferentes tipos de eficiencia.

	Media
Eficiencia eléctrica a 3,2 A y 3,15 V	43,1
Eficiencia térmica a 3,2 A y 3,15 V	51,9
Eficiencia eléctrica a 8,7 A y 4,2 V	33,4
Eficiencia térmica a 8,7 A y 4,2 V	39,6

Nota. Tomado de Vermeersch, 2018

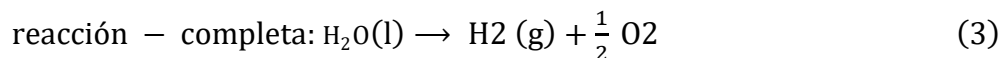
2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

2.2.1 *Electrolisis*

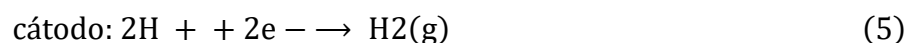
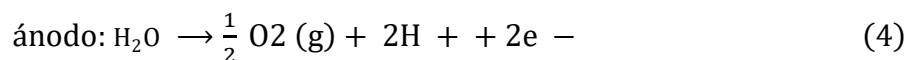
La electrolisis consiste en la ruptura de la molécula de agua por acción de una corriente eléctrica (Yolanda & Soria, 2006). La electrolisis es la generación de reacciones químicas de reducción-oxidación-, es decir, la transferencia de electrones que ocurren entre un agente reductor y un oxidante, por medio del paso de electricidad a través de los electrolitos para separar agua en

sus componentes primordiales: hidrógeno y oxígeno (F. A. Jiménez-Becerra , F. Oviedo-Tolentino , M. Loredó-Tovías, 2021).

La ecuación que describe este proceso es:



En nuestro caso al tener una celda eléctricamente conectada genera dos sub-reacciones que se describen así:



La electrolisis del agua es un proceso en el cual se disocia la molécula de agua en sus componentes fundamentales, hidrógeno y oxígeno. Esto sucede cuando se cumplen ciertas condiciones de diferencia de potencial, temperatura, pH, presión, conductividad del agua, entre otras. Dadas unas condiciones de los factores mencionados, se tendrá que, al aplicar un campo eléctrico superior a un umbral, el enlace entre los átomos de hidrógeno y oxígeno de la molécula de agua se rompe. (Godula-Jopek, 2015)

2.2.2 Celda de hidrogeno

La tecnología de celdas de combustible permite usar el hidrógeno como almacenamiento de energía. Una celda está compuesta básicamente por tres componentes elementales el ánodo que es el portador de la carga positiva, el cátodo con la carga negativa y una membrana electrolítica que se encarga de filtrar los iones de hidrogeno e impide el paso de los gases. El combustible en este caso es el hidrógeno, el cual se introduce por una placa bipolar del lado del ánodo, y guiada a través de una capa difusora la cual se encarga de distribuir el hidrogeno hacia la capa catalizadora, donde se lleva a cabo la producción del hidrogeno. La capa difusora es de un material poroso, ya

que esta propiedad permite que el hidrogeno se distribuya de una manera óptima al momento de entrar en contacto con la superficie del catalizador. (Aguirre Guevara, 2013)

2.2.3 *Energía del Hidrógeno*

Teniendo en consideración que la entalpía de disociación del agua líquida es $285,84 [kJ \cdot mol^{-1}]$, su entropía es $\Delta S_{d o} (H_2O (l)) = 163,15 [J \cdot mol^{-1}K^{-1}]$, y utilizando la ecuación de energía libre de Gibbs, se puede determinar la energía que se debe suministrar al sistema a temperatura y presión normal la cual es mostrada en la ecuación. (Vermeersch, 2018)

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S \quad (6)$$

Donde

ΔH es la entalpía

ΔG es la energía libre de Gibbs

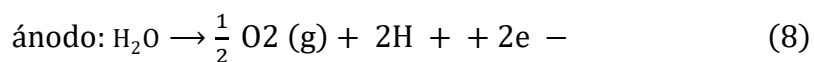
T es la temperatura (en Kelvin)

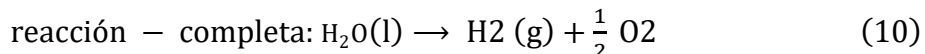
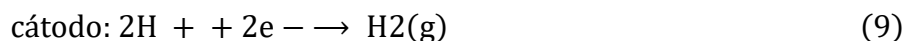
ΔS es la entropía

Entonces,

$$\Delta G_{d o} (H_2O(l)) = \Delta H_{d o} (H_2O(l)) - T \cdot \Delta S_{d o} (H_2O(l)) = 237,22 [kJ \cdot mol^{-1}] \quad (7)$$

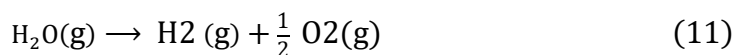
La termodinámica indica que la reacción de disociación del agua es una reacción no espontánea, en consecuencia, se debe inyectar energía para que esta se produzca. Esta energía se inyecta en forma de electricidad, por lo que para la realización de una electrolisis se debe determinar la tensión en los electrodos necesaria para que comience la reacción. Para esto, se analiza las semirreacciones de oxidación, de reducción y posteriormente la reacción completa.(Godula-Jopek, 2015).





Las reacciones son llamadas reacción de evolución del oxígeno (OER: Oxygen Evolution Reaction) y reacción de evolución del hidrógeno (HER: Hydrogen Evolution Reaction) respectivamente. (Godula-Jopek, 2015)

Teniendo en cuenta lo anterior se debe conocer la entalpía de evaporación del agua para poder obtener la energía que se puede obtener del hidrogeno.



$$\Delta S_{\text{o}}^{\text{d}}(\text{H}_2\text{O}(\text{vap})) = 44,1 [\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (12)$$

La siguiente propiedad física para tener en cuenta es la tensión mínima del agua, este dato es importante porque nos da una referencia para obtener la energía libre de Gibbs (ΔG_d)

que se obtiene de la siguiente ecuación.

$$\Delta G_d - n \cdot F \cdot E = 0 \quad (13)$$

Donde

n es el número de electrones intercambiados durante la reacción

F es la constante de Faraday ($96.485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$)

E es la cantidad de energía eléctrica utilizada para producir la reacción.

Se puede observar que hay variables dependientes como ΔG_d y la entalpía del agua que se va a ver a continuación.

$$\Delta G_d(T, P) = \Delta H_d(T, P) - T\Delta S_d(T, P) \quad (14)$$

Entonces se obtienen dos tipos de tensiones para poder realizar la electrolisis.

Tensión de electrolisis de energía libre. $E(T, P)$

$$E^{\circ}(T, P) = \frac{\Delta G_d(T, P)}{nF} \quad (15)$$

Tensión de la entalpía. $U(T, P)$

$$U^{\circ}(T, P) = \frac{\Delta H_d(T, P)}{nF} \quad (16)$$

Para saber las tensiones para poder realizar la electrolisis es necesario reemplazar los valores y definir estas tensiones los datos anteriormente mencionados.

$$\Delta G_d^{\circ}(\text{H}_2\text{O}) = 237,22 \text{ [kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] \Rightarrow E^{\circ} \frac{\Delta G_d(T, P)}{nF} = \approx 1,23[\text{V}] \quad (17)$$

$$\Delta H_d^{\circ}(\text{H}_2\text{O}) = 285,84 \text{ [kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] \Rightarrow U^{\circ} = \frac{\Delta H_d(T, P)}{nF} \approx 1,48[\text{V}] \quad (18)$$

Estas tensiones se los utiliza para saber el rango en el proceso de electrolisis se puede realizar, ya que existe una diferencia potencia.

Con estos datos se puede afirmar lo siguiente.

Menor que E° la electrólisis no se produce

Mayor que E° y menor que V° hay una reacción, pero no es la suficiente energía eléctrica.

Mayor que V° , hay la reacción y la potencia eléctrica va a ser capaz de mantener la temperatura del sistema.

En el antecedente mencionado se observa una experimentación en la cual se utiliza una eficiencia eléctrica para así obtener datos y poder compararlos.

La eficiencia eléctrica se determina utilizando la cantidad de energía que podría entregar 1 mol de hidrógeno, la cual sería la entalpía de disociación del agua que se menciona anteriormente

$$E_{\text{hidrogeno}} = 237,22 \text{ [kJ]} \text{ (Godula-Jopek, 2015)}$$

2.2.4 Métodos de obtención de hidrogeno

El hidrógeno se puede producir usando diferentes tecnologías como pueden ser procesos térmicos o catalíticos (reformado de gas natural o de diferentes hidrocarburos), de los procesos electrolíticos como la descomposición del agua y también foto líticos (a partir del agua utilizando el sol mediante materiales biológicos y electroquímicos).(Aguirre Guevara, 2013)

2.3 Definición de conceptos

2.3.1 Definición nominal de variables

2.3.1.1 Eficiencia energética

La eficiencia energética como concepto, agrupa acciones que se toman tanto en el lado de la oferta como de la demanda, sin sacrificar el bienestar ni la producción, permitiendo mejorar la seguridad del suministro. Logrando, además, ahorros tanto en el consumo de energía como en la economía de la población en general. Simultáneamente se logran reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero y mejoras en las finanzas de las empresas energéticas. (Poveda, 2007).

La eficiencia se puede entender como el grado en que se cumplen los objetivos de una iniciativa al menor costo posible. El no cumplir cabalmente los objetivos y/o el desperdicio de recursos o insumos hacen que la iniciativa resulte ineficiente. (Mokate, 2001)

2.3.1.2 Carga eléctrica:

Si hay cargas libres en un volumen, puede crearse una corriente eléctrica a través de una superficie de su interior moviendo las cargas libres con velocidad de dirección adecuada para que atraviesen esa superficie. Eso puede conseguirse aplicando fuerzas a las cargas libres del

conductor, o sea, creando un campo eléctrico E en el conductor. Las cargas libres de los conductores reales son electrones o iones de volumen muy pequeño, por lo que pueden considerarse, sin error, cargas puntuales. (Quintela, 2000)

2.3.1.3 *Electrolito*

Se define como electrolito a toda sustancia con iones libres, capaz de transportar la corriente eléctrica y que se encuentra en forma de sólido fundido o presente en una disolución. (Bustamante, 2013)

2.4 Hipótesis

2.4.1 *Hipótesis de Investigación*

La producción de hidrogeno mediante el proceso de electrolisis obtiene un 48% de eficiencia en la generación de Hidrogeno.

2.4.2 *Hipótesis nula*

La producción de hidrogeno mediante el proceso de electrolisis NO se obtiene 48% de eficiencia en la generación de Hidrogeno.

2.4.3 *Hipótesis alternativa*

La producción de hidrogeno mediante el proceso de electrolisis obtiene entre un 30% a 50% de eficiencia en la generación de Hidrogeno.

3. Metodología

3.1 Enfoque

El enfoque de la investigación es cuantitativo, dado que las variables asociadas al objeto de investigación son cuantitativas o cuantificables; por tanto, los resultados obtenidos permitirán determinar que variaciones en la celda de producción de hidrogeno presentara mayor eficiencia.

3.2 Paradigma

Desde el punto de vista epistemológico y metodológico el paradigma que orienta la investigación cuantitativa es el *neopositivismo*, término instituido por el filósofo francés Auguste Comte (Quijano, Vodniza, 2009)

Esta investigación de encuentra dentro del paradigma positivista, ya que se aplica conocimientos científicos caracterizándose por tener resultados reales, útiles y precisos que tangan respaldo contra un estudio diferente que no tenga presente a la ciencia.

3.3 Método

Al ser esta investigación cuantitativa, el método que se utilizó es científico, o también conocido como método empírico-analítico(Quijano, Vodniza, 2009)

Donde se busca encontrar la eficiencia de una celda de producción de hidrogeno, utilizando información científica y controlando los parámetros o materiales de la misma celda en el proceso de producción con el fin de validar o rechazar los supuestos y resolver así la pregunta de investigación previa.

3.4 Tipo de Investigación

El tipo de método es descriptivo puesto que se plantea determinar la eficiencia de la producción de hidrogeno por medio de un diseño de celda de electrolisis de este mismo teniendo en cuenta la energía empleada con relación a la eficiencia del hidrogeno que nos permitan saber la eficiencia total del sistema de electrolisis.

3.5 Diseño de Investigación

El diseño de esta investigación (**RG X O**), se define como experimento puro, ya que se pretende diferenciar parámetros para obtener una celda eficiente en la producción de hidrogeno por medio de electrolisis cambiando los componentes de esta. Por lo tanto, se obtienen el siguiente grupo experimental.

RG1 X1 O1

RG2 X2 O2

Donde:

RG1: Celda de Producción de Hidrogeno por Electrolisis parámetros 1.

RG2: Celda de Producción de Hidrogeno por Electrolisis parámetros 2.

X1: Diseño de Electrodo

X2: Cantidad de Electrolito

O1: Cantidad de Hidrogeno

O2: Cantidad de Hidrogeno

3.6 Universo

Es la celda de producción de hidrogeno mediante el proceso de electrolisis que poseen diferentes características o parámetros de diseño e implementación.

3.7 Muestra

Celda de producción de hidrogeno mediante el proceso de electrolisis con diferentes parámetros o materiales escogida de manera aleatoria con relación al universo.

3.8 Técnicas de Recolección de Información

Basándonos en fórmulas como la de eficiencia, la cuantificación del electrolito y la conductividad eléctrica del agua, la estrategia del presente trabajo de grado para recopilar información consistirá en la aplicación matemática de estas fórmulas junto con observaciones directas periódicas de la celda de producción de hidrógeno en intervalos específicos durante un tiempo determinado. La observación directa que se plantea realizar viene dada por un principio de funcionamiento ya establecido por estas mismas formulas, esto por la eficiencia eléctrica y la energía necesaria para que se lleve a cabo el proceso de electrolisis en la separación de las moléculas que constituyen el agua. La determinación de la cantidad de hidrógeno que se busca obtener se basa en el cálculo del caudal de la celda utilizando el método de la probeta invertida. Este método implica medir el desplazamiento del agua debido a la entrada de hidrógeno durante el tiempo necesario para llenar la probeta por completo de almacenamiento donde nos arrojará un valor en *ml*.

3.9 Validez de la técnica

La técnica de recolección de información es válida, ya que son propiedades que demuestran de forma cuantificable la efectividad del proceso con relación a la cantidad de energía utilizada y la producción de hidrogeno.

3.9.1 *Confiabilidad de la técnica*

La técnica seria confiable, ya que se podrá obtener valores reales de cuanta producción de hidrogeno se obtendrá después del proceso utilizando instrumentos de medición cuantificables tales como una probeta ordinaria.

3.9.2 *Instrumentos de recolección de información*

Fichas o cuadernillos de registro y/o bases de datos.

Fuentes de alimentación.

Probeta.

Videocámara.

Temporizador.

4. Resultados de la investigación

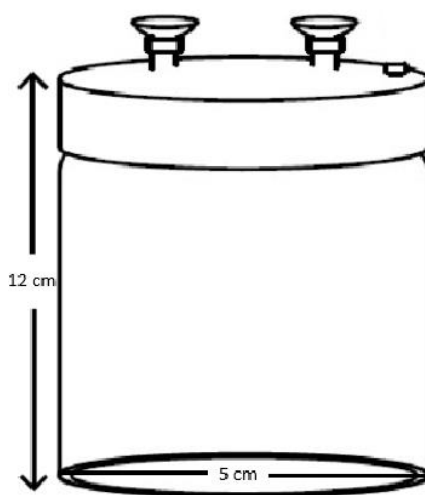
4.1 Objetivo 1. Diseñar una estructura, sistema eléctrico y esquema de producción para hidrogeno verde.

A continuación, se describe cómo se realizó el diseño y la configuración para la celda de electrólisis adecuada.

En primer lugar, se utilizó un recipiente de cristal templado, su uso garantiza una barrera positiva contra pérdidas de calor y resistencia a diferentes temperaturas. Asimismo, la transparencia del material facilitó la observación del proceso lo que es fundamental para el análisis de los resultados.

El recipiente utilizado presenta unas dimensiones de 12 cm de alto y 5 cm de diámetro (como lo indica la figura 4); también se implementó un sistema hermético con el propósito de prevenir fugas de gases, garantizando así la seguridad del entorno y manteniendo una presión adecuada, lo que a su vez contribuye a la reducción de pérdidas.

Figura 4
Recipiente utilizado para electrolisis.

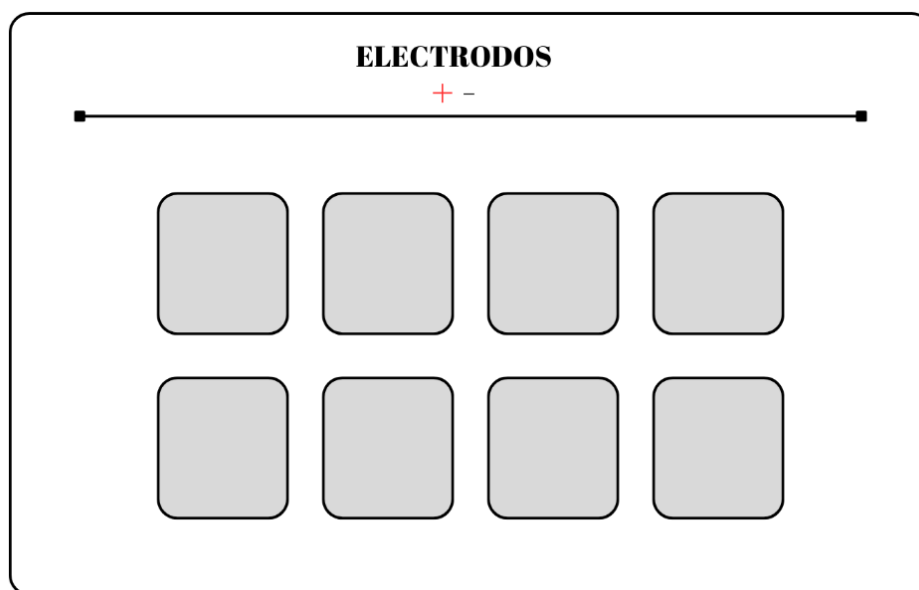


Con lo anterior, se planteó emplear electrodos con dimensiones específicas ya que se tiene un recipiente con medidas definidas. Estos electrodos fueron diseñados con una forma rectangular y un calibre 22, para que el área fuese acorde dentro del recipiente.

De acuerdo con la revisión bibliográfica, se seleccionó el acero inoxidable ya que este posee una resistencia notable a la corrosión y una buena conductividad eléctrica, lo cual se ajustó de manera óptima al diseño establecido (Montes et al., 2016).

Estos electrodos son los que realizan una transferencia de corriente eléctrica durante el proceso de electrólisis por lo en este proceso las cargas positivas (+) atraen al oxígeno y las cargas negativas (-) atraen al hidrogeno.

Figura 5
Forma de electrodos para celda de electrolisis.



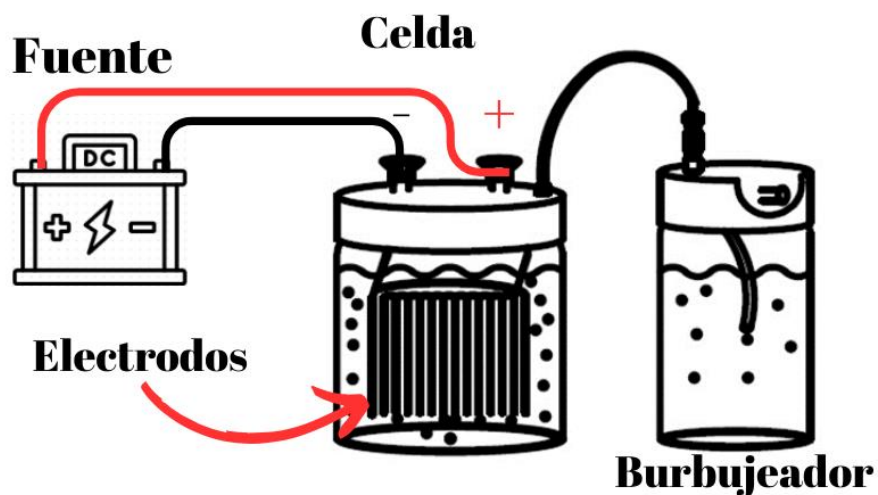
Con el fin de garantizar una conductividad adecuada y un rendimiento óptimo en el proceso de electrólisis se incorporó un electrolito en la celda que, de acuerdo con la revisión literaria, se hace uso del hidróxido de sodio (NaOH) debido a su alta conductividad iónica y disponibilidad local. El NaOH se descompone en iones de sodio (Na⁺) e iones hidróxido (OH⁻) en el agua

facilitando la conducción de la corriente eléctrica en la celda; es importante resaltar que el NaOH no presenta riesgos perjudiciales ni peligrosos siempre y cuando se lo maneje siguiendo las normas de bioseguridad.

En resumen, a través del diseño estructural de la celda, la elección de los electrodos de acero inoxidable, el uso del electrolito de hidróxido de sodio y la incorporación de un burbujeador, se buscó maximizar la eficiencia y la cantidad de hidrógeno producido durante el proceso de electrólisis, garantizando la seguridad y la buena obtención de hidrógeno verde.

En la *Figura 6* representa el diagrama del sistema de generación de hidrógeno que se utilizó para la realización de las pruebas.

Figura 6
Diseño de estructura de celda de electrólisis.



4.2 Objetivo 2. Diferenciar parámetros de funcionamiento de la celda que influyen en la obtención de hidrogeno

En este objetivo del proyecto analizó y diferenció los parámetros para el funcionamiento de la celda que influyeron en la obtención de hidrógeno durante el proceso de electrólisis. Este es

un proceso electroquímico en el que intervienen múltiples factores que afectan la eficiencia y la calidad del hidrógeno producido. Entre estos se encuentran:

- Concentración del electrolito
- Corriente y voltaje aplicado
- Volumen de producción

Las corrientes eléctricas y voltajes son dependientes de la cantidad de electrolito que se emplee, ya que se mejora la conductividad eléctrica, por eso estos parámetros son los elegidos para diferenciar y comparar su producción. Y por su parte, la velocidad de reacción y la conductividad iónica afectan directamente la eficiencia de la electrólisis.

Teniendo en cuenta que, en el proceso de electrólisis, al descomponerse la molécula del agua (H_2O), las moléculas de hidrogeno las atrae el polo negativo (-) y las moléculas de oxígeno el polo positivo (+), es muy importante la distribución estratégica de los electrodos para obtener la mayor cantidad del gas de interés.

4.3 Objetivo 3. Comparar configuraciones de la celda para ver cuál es la más eficiente y económica.

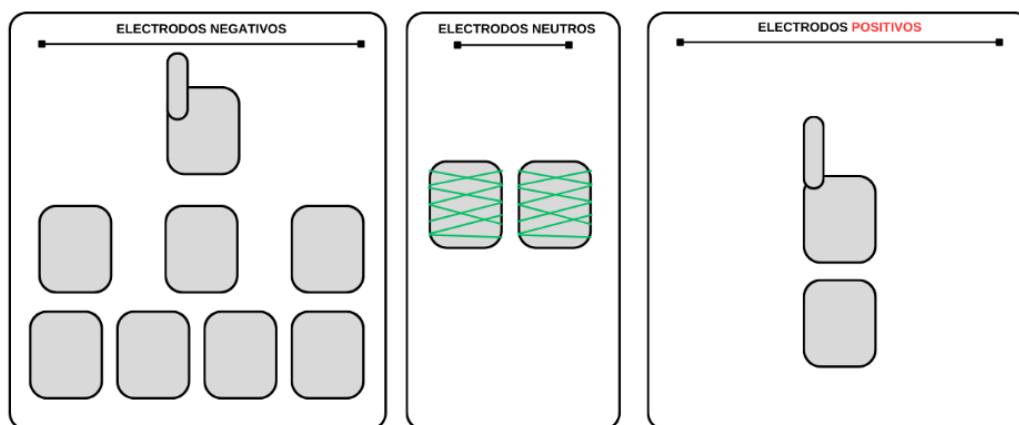
Las configuraciones se definen como los arreglos y/o combinaciones específicas de parámetros utilizados para determinar cuál es la configuración más idónea en la generación de hidrógeno

Con relación a este objetivo de investigación, se ejecutaron experimentos y análisis para determinar el impacto de estos parámetros de funcionamiento que influyen en la producción de hidrógeno.

Para lograrlo, se llevó a cabo una evaluación de la variación de cada parámetro de forma individual. En este diseño se construyó una celda en la cual se emplearon 12 placas de acero inoxidable 430, con un tamaño de 6 cm de alto y 5 cm de ancho separadas entre sí por una malla plástica como aislante. Estos materiales se eligieron teniendo en cuenta un punto fundamental que es el costo y el fácil acceso a estos.

Este diseño cuenta con un electrodo positivo (+) que contiene con 2 placas y un electrodo negativo (-) con 8 placas y estos separados con 2 placas neutras.

Figura 7
Electrodos negativos, neutros y positivos respectivamente.



Así, se construye la celda con este diseño y estos materiales para evaluar su funcionamiento y obtener los primeros resultados

Mediante este enfoque, se buscó cuantificar cómo cada parámetro afecta el proceso de obtención de hidrógeno con el objetivo de identificar medidas y tendencias en la respuesta de la celda. Al obtener estos resultados se procedió a realizar una investigación detallada por separado sobre los parámetros que influyen en el proceso de electrolisis, así como la cantidad en gramos del electrolito y su consumo energético.

La electrólisis, como método para la producción de hidrógeno, es un área de investigación fundamental en el desarrollo de tecnologías sostenibles. Para la descomposición del agua en

hidrógeno y oxígeno, se indujo 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

Una parte de este estudio se enfocó en la variación de la electroconductividad al suministrar diferentes cantidades de hidróxido de sodio (NaOH) durante el proceso de electrólisis, esto en función del tiempo que transcurre una vez se le proporcione el electrolito. Entonces, el electro conductividad se presenta como un indicador clave, ya que refleja la presencia de iones en la solución, siendo estos cruciales para el desarrollo de la reacción.

A través de la toma de resultados y con ayuda del medidor TDS&EC utilizado en una de sus funciones de conductividad, se midió el electro conductividad del agua en condiciones controladas como la temperatura ambiente, ajustando la concentración de NaOH.

Tabla 4

Pruebas realizadas de electro conductividad con diferentes cantidades de electrolito (g).

		ELECTROLITO (NAOH)					
		5 g	10 g	15 g	20 g	25 g	30g
ELECTRO CONDUCTIVIDAD (µS/CM)		2400	1040	5830	6400	3446	3800
		1610	2040	6000	6225	3400	3850
		1610	2100	5890	6010	3510	3825
		1620	2060	5900	5980	3442	3800
		1620	2140	6000	6000	3320	3795
		1630	2400	5800	6420	3400	3825
		1940	2450	5930	5990	3446	3850
		1940	2300	5900	6010	3450	3800
		1980	2220	6000	6350	3320	3765
		1980	2300	5800	6400	3442	3800

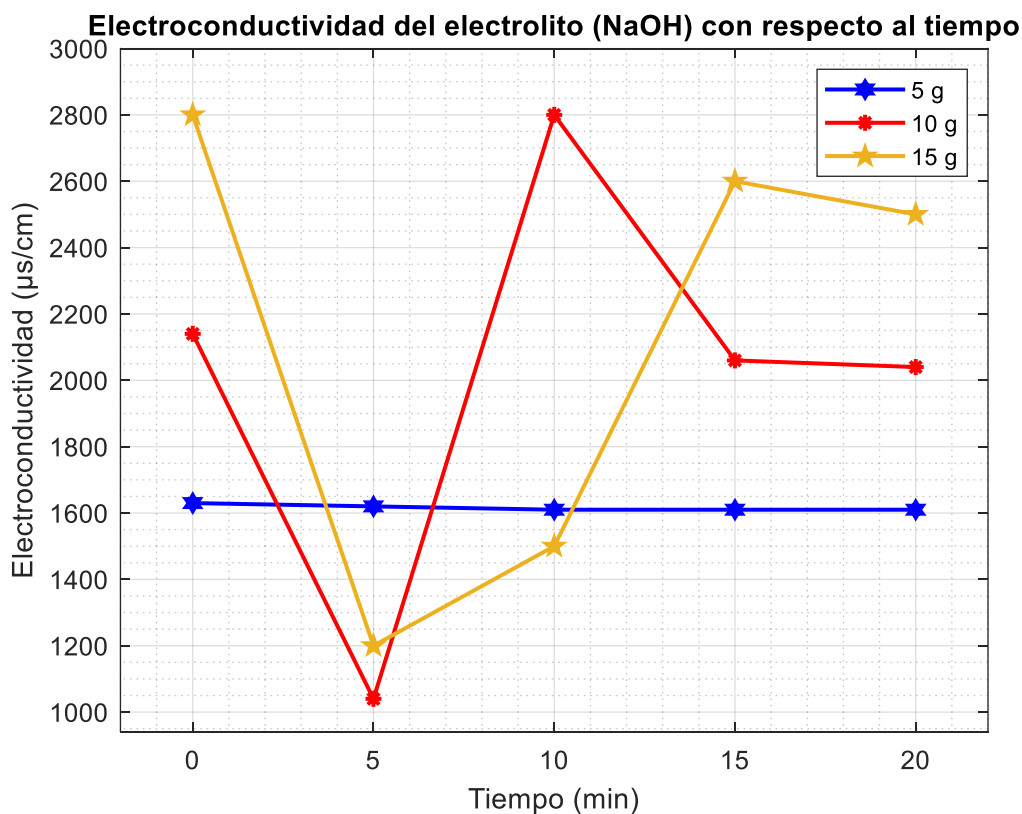
Tras considerar los resultados previos, se abrió la posibilidad de llevar a cabo un análisis con el fin de identificar y establecer parámetros de funcionamiento óptimos. Este proceso se vuelve fundamental al observar la presencia de valores notables de conductividad, que son indicativos de

un desempeño favorable en la operación de la celda. Esto permitió comprender los factores que influyen en la eficiencia del sistema, pues da lugar a una mejor conductividad en la celda.

Los resultados obtenidos (*Figura 8*) ofrecen una visión relevante sobre la relación entre la cantidad de electrolito y la conductividad eléctrica en el agua a lo largo del tiempo.

Figura 8

Electroconductividad de NaOH vs tiempo.



Los resultados (Tabla 4) experimentales revelaron un fenómeno interesante y, en cierto modo, esperado en relación con la concentración de hidróxido de sodio (NaOH). Se observó que, a ciertas concentraciones, la electroconductividad muestra una tendencia a saturarse y volverse inestable con el tiempo, mientras que en otras concentraciones la estabilidad se mantiene desde el inicio del proceso.

Este fenómeno podría atribuirse a la complejidad de las interacciones químicas y eléctricas en juego. Ello debido a que, en concentraciones elevadas de NaOH, es posible que se alcance una saturación de iones en la solución, lo que limita la capacidad para conducir la corriente eléctrica de manera eficiente. Como consecuencia, la saturación podría generar una respuesta inestable en la electroconductividad a medida que progresa la electrólisis.

Por otro lado, concentraciones moderadas de NaOH podrían favorecer una mayor estabilidad, permitiendo una mejor conducción eléctrica sin llegar a puntos críticos de saturación (Tabla 5). Este fenómeno subraya la importancia de un equilibrio preciso en la concentración de electrolito para optimizar el proceso de electrólisis y la generación de hidrógeno.

Tabla 5
Conductividad del electrolito.

Tiempo (min)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)		
	Cantidad de Electrolito (g)		
	5 g	10 g	15 g
0	1630 x10	2140 x10	2800 x10
5	1620 x10	1040 x10	1200 x10
10	1610 x10	2800 x10	1500 x10
15	1610 x10	2060 x10	2600 x10
20	1620 x10	2040 x10	2500 x10

Adicionalmente, se llevaron a cabo mediciones de corriente y voltaje en distintas concentraciones de NaOH para complementar la comprensión del proceso. Estas mediciones ofrecieron una perspectiva más completa sobre la dinámica eléctrica de la electrólisis y su relación con la concentración de electrolito. Los resultados de las mediciones presentadas en la *Figura 2*

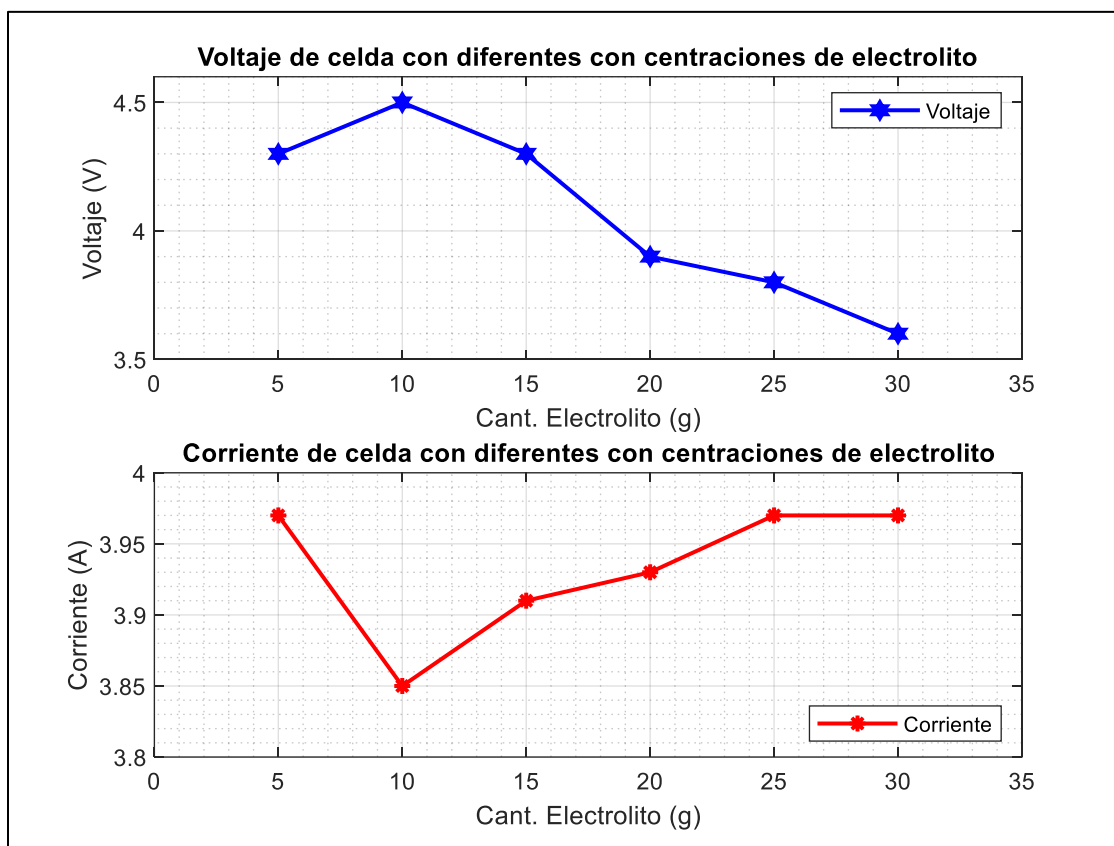
proporcionaron información detallada sobre la respuesta eléctrica de la celda electrolítica en función de la cantidad de NaOH suministrada.

Las mediciones de corriente y voltaje a diferentes concentraciones de hidróxido de sodio (NaOH) revelaron una notoria estabilidad en los resultados, con cambios mínimos a lo largo de las variaciones en la cantidad de electrolito. Este fenómeno podría derivarse de un comportamiento consistente en la conducción iónica dentro de la solución, sugiriendo que la presencia de iones provenientes del NaOH es adecuada para mantener estos valores de manera estable. Además, la estabilidad en las mediciones indica la obtención de un equilibrio óptimo en la concentración de electrolito, donde aumentos adicionales no generaron mejoras sustanciales en la conductividad eléctrica. Esta estabilidad es consecuencia de la optimización de parámetros experimentales específicos y la resistencia interna de la celda, lo que sería un causante sobre los efectos de cambio en la concentración de NaOH.

Estos hallazgos, aunque inicialmente indican una estabilidad, proporcionan una base valiosa para la exploración de ajustes adicionales y la comprensión más profunda de los factores que influyen en la dinámica eléctrica en el proceso de electrólisis.

Finalmente, se generó una curva gráfica (Figura 9) que representa la relación entre la cantidad de corriente aplicada y la conductividad eléctrica de la celda para diferentes concentraciones de electrolito. Esta curva proporcionó una comprensión detallada de cómo la conductividad eléctrica responde a la variación en la cantidad de NaOH, lo cual permite una mayor comprensión del proceso de electrólisis.

Figura 9
Voltaje (V) y Corriente (A).



Los resultados de electro conductividad obtenidos en un rango de 0 a 30 gramos de hidróxido de sodio (NaOH), con incrementos de 5 gramos, revelaron un fenómeno en la curva de electroconductividad. A medida que se avanzó en la serie de mediciones, se observaron notables puntos elevados en las concentraciones de 15 y 20 gramos de NaOH. Estos puntos anómalos introducen una variabilidad que interrumpe la aparente curva ascendente y estable observada en otras concentraciones. Este suceso podría sugerir respuestas no lineales o cambios significativos en la conductividad a concentraciones específicas de electrolito. Así pues, las concentraciones de 15 y 20 gramos podrían estar asociadas con estados particulares diferentes a las otras mediciones de la solución, ya que provocan un aumento inusual en la conductividad eléctrica (tabla 6).

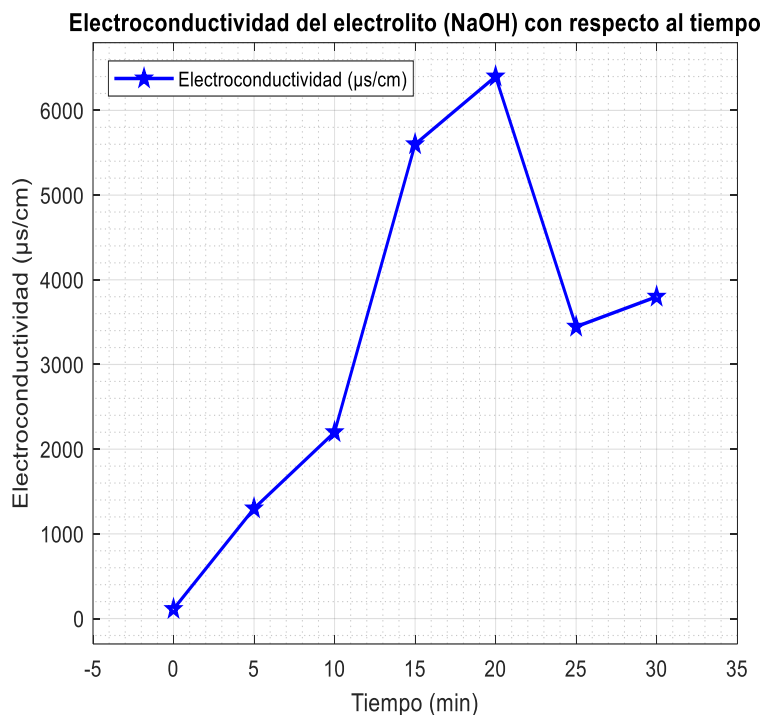
Tabla 6
Electroconductividad del Cloruro de Sodio (N_aOH).

Cant. Electrolito N_aOH (g)	Electroconductividad ($\mu s/cm$)
0 g	112
5 g	1300 x10
10 g	2200 x10
15 g	5600 x10
20 g	6400 x10
25 g	3446 x10
30 g	3800 x10

El hidróxido de sodio, debido a su naturaleza alcalina, ofrece una excelente conductividad eléctrica. Esta característica ha llevado a su amplio uso en aplicaciones de electrólisis, respaldado por su disponibilidad y costos relativamente bajos. No obstante, es importante tener en cuenta que el hidróxido de sodio presenta ciertas limitaciones, como su alta concentración que puede influir en la eficiencia global del proceso, motivo por el cual se realizaron pruebas específicas para evaluar y mitigar posibles desafíos asociados, como resultado observamos que la conductividad eléctrica depende mucho de las concentraciones, evidenciando una saturación en ciertas concentraciones (ver figura 10), por lo cual es vital analizar y establecer una concentración adecuada para la producción de hidrogeno.

Figura 10

Electroconductividad de la celda de electrolisis a diferentes cantidades de electrolito



4.4 Objetivo 4. Caracterizar la producción de hidrogeno de las celdas al realizar el proceso de electrolisis.

En el proceso de esta investigación se ha desarrollado una caracterización química, física y de producción de hidrógeno a través de una celda de electrólisis. El detallado análisis de múltiples factores y variables ha proporcionado una perspectiva integral sobre cómo estas influyen directamente la eficiencia completa del sistema. Las técnicas avanzadas de caracterización de materiales se pueden utilizar para analizar una amplia gama de propiedades, como la resistencia mecánica, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión. Con estas técnicas, los ingenieros pueden optimizar sus diseños para mejorar el rendimiento y la fiabilidad, al comprender las características materiales de los diferentes componentes de un sistema. Esto ayuda a tomar mejores decisiones sobre cómo usarlos para crear productos seguros y eficientes, así como nuevos materiales que se comportan de una manera específica según su utilidad (Innovation Atria, 2023).

A continuación, se presentan los resultados sobresalientes que surgen como contribuciones significativas al entendimiento de esta caracterización.

Para el objetivo en cuestión, se realizó un análisis comenzando con la caracterización química y física sobre los materiales empleados en la celda de electrólisis. Lo mismo con el electrolito utilizado se destacó la necesidad de seleccionar cuidadosamente materiales duraderos y de alta calidad para hacer de este un proyecto sostenible. Y, se han encontrado algunas recomendaciones para la elección de materiales que no solo ayudan en la eficiencia, sino que también garantizan duración y estabilidad de la celda.

Teniendo en cuenta la revisión literaria para realizar los objetivos previamente establecidos (véase desarrollo del objetivo 1), se ha llegado a la conclusión de seleccionar el acero inoxidable como el material en su totalidad de la celda de electrólisis. Esta elección se fundamenta en un análisis de las propiedades intrínsecas del acero inoxidable, que no solo permiten alcanzar la producción de hidrógeno, sino que también garantizan una durabilidad y una sostenibilidad destacada a lo largo del ciclo de vida del sistema. Las características del acero inoxidable, como su resistencia a la corrosión, su buena conductividad eléctrica y su capacidad para soportar condiciones variables (Padilla, 1999) han demostrado ser fundamentales, por ende, prolongando significativamente la vida útil de la celda.

La decisión de utilizar acero inoxidable en la celda no solo se beneficia en sus propiedades técnicas, sino también apoyando así los principios de sostenibilidad ambiental, ya que este material puede ser reciclado. Esta consideración resalta el compromiso no solo con la eficiencia energética sino también con la responsabilidad ambiental en la implementación de tecnologías como la electrólisis.

Tomando en consideración los resultados obtenidos y teniendo el material establecido, se llevaron a cabo pruebas que involucran dos tipos de electrolito. Esto con el fin de evidenciar su impacto de los electrolitos en los materiales de la celda de electrólisis, y también en el rendimiento general de la producción de hidrógeno.

La elección de emplear dos variantes de electrolitos se fundamentó en las propiedades químicas de estos componentes esenciales que pueden tener un impacto en la sostenibilidad y estabilidad de la celda. Al estudiar su influencia en los materiales de la celda, se buscó un análisis más completo de cómo los electrolitos interactúan con estos elementos y, por ende, influyen en la durabilidad del sistema.

Adicionalmente, el análisis de la producción de hidrógeno bajo condiciones específicas de los dos electrolitos permitió una apreciación de cómo estas variaciones químicas afectan directamente a la sostenibilidad y el desarrollo general del proceso de electrólisis.

Este planeamiento experimental no solo proporcionó conocimientos sobre la compatibilidad de dos diferentes electrolitos con los materiales de la celda, sino que también brindó información sobre posibles mejoras en la producción de hidrógeno, fortaleciendo así una visión de la tecnología de electrólisis.

Los electrolitos que se llevaron a cabo en las pruebas corresponden a Hidróxido de Sodio (NaOH) y Cloruro de Sodio (NaCl). Estas elecciones se basan en la disponibilidad de ambos electrolitos en el mercado local, así como en su reconocida conductividad eléctrica, gracias a sus propiedades químicas (Gina & Fernández, 2018). Sin embargo, es importante tener en cuenta que, aunque ambos electrolitos presentan beneficios, también están acompañados de ciertas contraindicaciones, destacando especialmente la susceptibilidad a la corrosión, siendo más grande

en el caso del cloruro de sodio (NaCl) en comparación con el hidróxido de sodio (NaOH) (Montes et al., 2016).

Consecuentemente, la realización de aproximadamente 190 a 220 pruebas utilizando el electrolito Hidróxido de Sodio (NaOH) han expuesto aspectos fundamentales acerca de la resistencia y durabilidad de los materiales de la celda de electrólisis.

De manera importante, se ha evidenciado un mínimo deterioro en los materiales de la celda durante este período de pruebas. Este resultado es valioso al considerar la poca ausencia de corrosión en los componentes (figura 11) y la resistencia de los materiales frente al desgaste provocado por las pruebas repetitivas (figura 12).

Figura 11

Cristal de la celda después de pruebas realizadas.

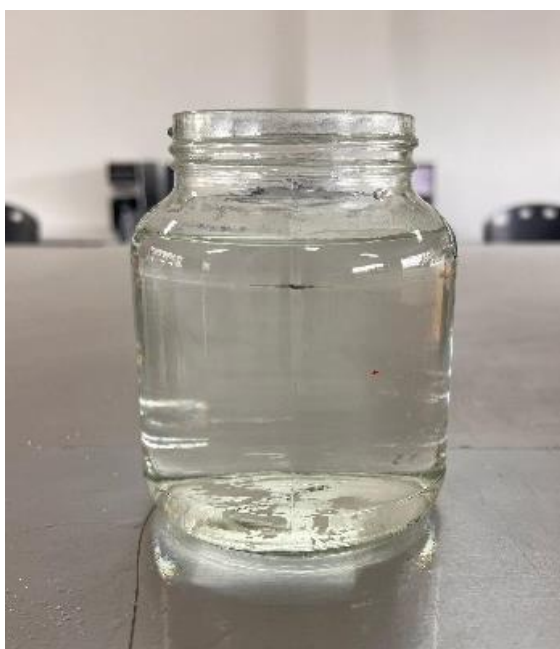


Figura 12
Electrodos después de pruebas realizadas.



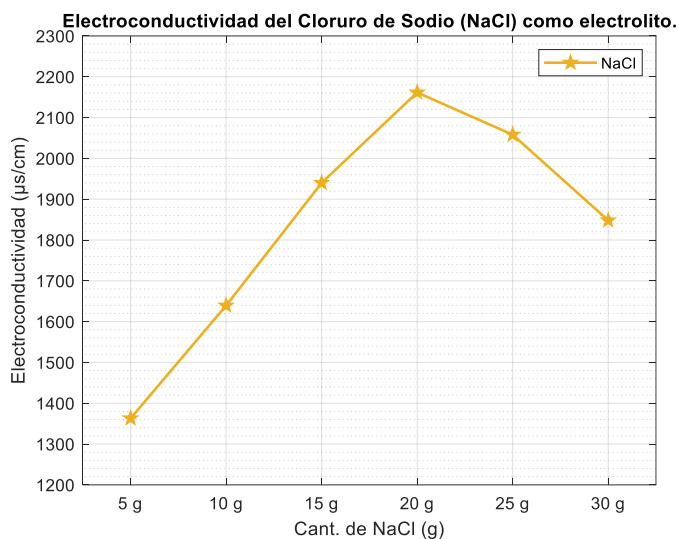
Con lo anterior, se destaca la calidad de los materiales de la celda, que han demostrado una capacidad de resistencia incluso después de un extenso uso. Esto evidenció los beneficios significativos que los caracteriza, ya que, hasta el momento, no ha sido necesario reemplazar los materiales de la celda. Dicho hecho no solo contribuye al buen funcionamiento operativo del sistema, sino que también incide positivamente en la economía y sostenibilidad del proceso de electrólisis.

En cuanto al cloruro de sodio (NaCl), su empleo como electrolito también está respaldado por una conductividad eléctrica efectiva; sin embargo, su propensión a la corrosión plantea un desafío significativo. (Montes et al., 2016) La corrosión en comparación con algunas alternativas, puede afectar la durabilidad de los materiales de la celda y, por ende, la sostenibilidad a largo plazo

del sistema. En consecuencia, se abordaron pruebas para entender y abordar esta problemática, con el objetivo de mejorar su aplicación sin comprometer la integridad del sistema.

Figura 13

Electro conductividad del Cloruro de Sodio (NaCl) como electrolito.



Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con el electrolito cloruro de sodio (NaCl) revelaron una situación menos favorable. Tras someter la celda de electrólisis a tan solo 5 pruebas con este electrolito, se observó residuos y un deterioro significativo (figura 14) en los materiales de la celda, caracterizado por una corrosión bastante notable.

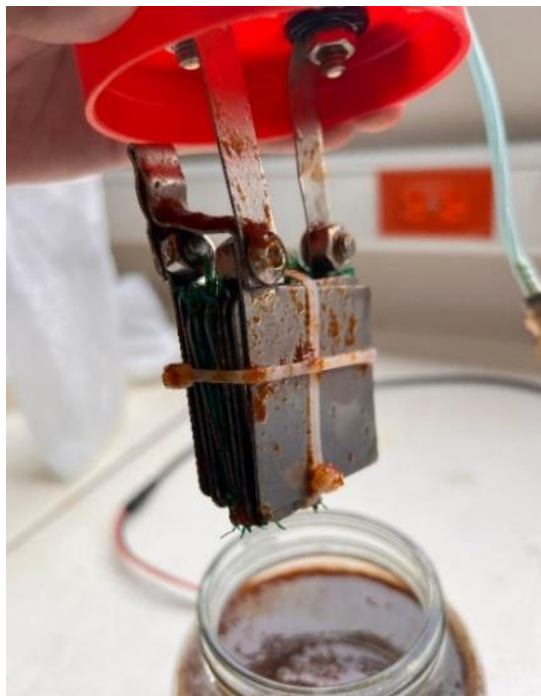
Figura 14

Cristal de la celda después de pruebas con NaCl.



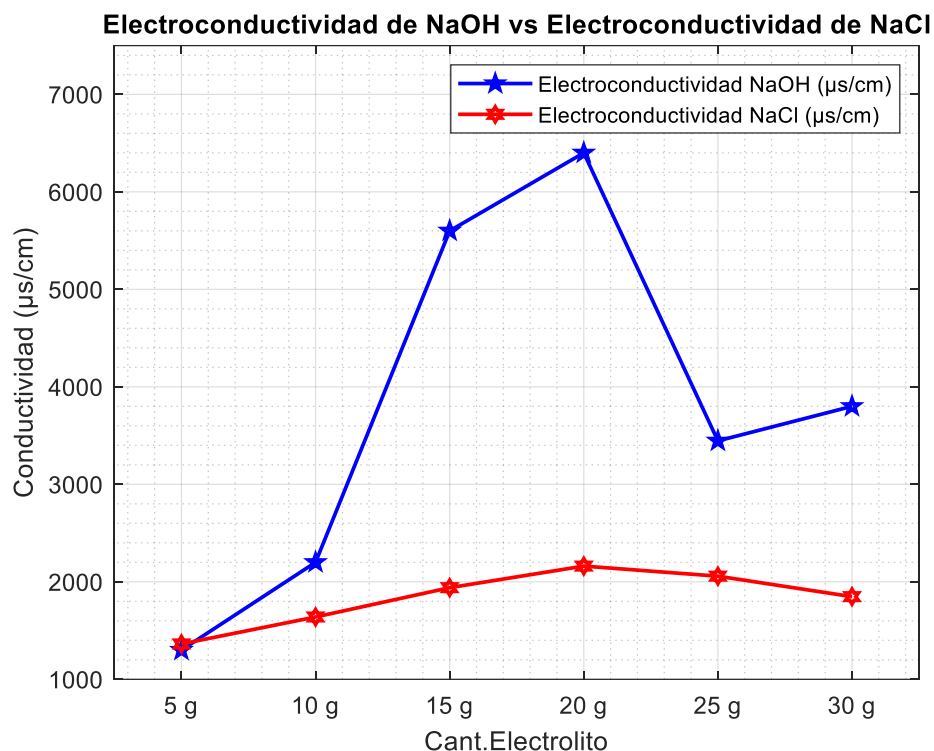
Figura 15

Electrodo de la celda después de pruebas con NaCl.



Esta reacción muestra una incompatibilidad entre el cloruro de sodio y los materiales utilizados en la celda, lo que plantea desafíos adicionales en términos de durabilidad y mantenimiento del sistema (ver figura 15). Estos resultados muestran la importancia de una cuidadosa selección de electrolito en el diseño y operación del sistema de electrólisis, con el fin de garantizar sostenibilidad y una vida útil prolongada de los componentes. En síntesis, la caracterización química y física evidenció la importancia de la elección de este parámetro; es por eso que al realizar pruebas con estos dos electrolitos específicos no solo se buscó aprovechar sus propiedades beneficiosas en términos de conductividad eléctrica (ver figura 16), sino también abordar y disminuir las contraindicaciones de estos, particularmente la corrosión. Este enfoque estratégico permitió un análisis más preciso de la idoneidad de estos electrolitos en el contexto de celda de electrólisis, contribuyendo así al desarrollo de sistemas más eficientes y duraderos para la producción de hidrógeno.

Figura 16
Comparación de electroconductividad entre NaOH y NaCl.



Considerando la caracterización de producción, se analizó el proceso de producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua. Este análisis comprendió la evaluación de su eficiencia y su rendimiento en términos de producción de hidrógeno.

El detallado análisis de estos factores y variables ha proporcionado una perspectiva integral sobre cómo estas influyen directamente la eficiencia del sistema. Las técnicas de caracterización de producción se pueden utilizar para analizar los factores que influyen, como la electrólisis y la energía de entrada que es necesaria para su funcionamiento.

A continuación, se presentan los resultados sobresalientes que surgen como contribuciones significativas al entendimiento de esta caracterización:

Teniendo en cuenta los parámetros definidos del sistema, los experimentos ejecutados y las adecuaciones necesarias se ha conseguido el funcionamiento óptimo de la celda, generando una

producción de 50 ml de manera estable en un intervalo de 39 segundos. Estos resultados son de vital importancia para evaluar la eficiencia del sistema y determinar hasta qué punto se alcanzó los objetivos previstos en este proyecto. Establecer un índice de logro de las expectativas es fundamental para medir el éxito de la implementación de este sistema, así como para guiar futuras investigaciones y mejoras en el proceso.

En el caso de la electrolisis del agua para producir hidrógeno, su ecuación química balanceada es:



Esta ecuación indica que dos moléculas de agua líquida se descomponen mediante la aplicación de corriente eléctrica, lo que en este caso significa el proceso de electrolisis, para producir dos moléculas de hidrógeno gaseoso (H_2) y una molécula de oxígeno gaseoso (O_2).

El proceso de balanceo de la ecuación asegura que la cantidad de átomos de cada elemento es la misma en ambos lados de la ecuación, lo que significa que la cantidad de materia no se crea ni se destruye durante la reacción química, solo se transforma (Mosquera et al., 2019). Esto es importante para calcular la cantidad teórica que se espera obtener durante el proceso de electrolisis. (Regalado-Méndez et al., 2014)

Para calcular la cantidad teórica con base en la corriente eléctrica y el tiempo de electrolisis, primero se necesitó determinar la cantidad total de carga eléctrica que pasa a través del sistema. Luego, se usó esta cantidad de carga eléctrica para calcular los moles de electrones transferidos y, finalmente, aplicar la relación estequiométrica para obtener los moles de producto esperados. En este orden de ideas, se obtuvo la carga eléctrica (Q) multiplicando la corriente (I) por un determinado tiempo (t). (Na & Hipertensiva, 2019)

Para este caso en específico $I = 4.89 A$ y $t = 39s$.

$$Q = I \times t \quad (20)$$

$$Q = 4.89 A \times 39 \text{ seg} \quad (21)$$

$$Q = 190.95 C \quad (22)$$

Una vez obtenida la carga eléctrica (Q), se procedió a encontrar la cantidad de moles de electrones transferidos con el fin de poder saber si se tendría o no una relación 2:1 con respecto al hidrogeno (H_2) y el oxigeno (O_2). Para ello se dividió la carga (Q) entre la constante de Faraday (C/mol). (Brito Évora, 2006)

$$\text{Moles de electrones } (n) = \frac{Q}{F} \quad (23)$$

$$\text{Moles de electrones } (n) = \frac{190.95 C}{96485 C/mol} \quad (24)$$

$$\text{Moles de electrones } (n) = 0.001979 \text{ moles} \quad (25)$$

Con la cantidad de electrones (n) se aplicó la relación estequiométrica mencionada anteriormente,

Para Hidrogeno

$$\text{Moles de hidrogeno} = \frac{(\text{Moles de electrones})}{4} \times 2 \quad (26)$$

$$\text{Moles de Hidrogeno} = \frac{0.001979}{4} \times 2 \quad (27)$$

$$\text{Moles de Hidrogeno} = 0.0009895 \quad (28)$$

Para Oxigeno

$$\text{Moles de Oxigeno} = \frac{(\text{Moles de electrones})}{4} \times 1 \quad (29)$$

$$\text{Moles de Oxigeno} = \frac{0.001979}{4} \times 1 \quad (30)$$

$$\text{Moles de Oxigeno} = 0.0004948 \quad (31)$$

Para determinar si se cumple la relación estequiométrica de 2:1 entre el hidrógeno y el oxígeno en la electrólisis del agua, simplemente se necesitó comparar las cantidades de moles de hidrógeno y oxígeno que se han calculado. (Regalado-Méndez et al., 2014)

- Moles de hidrógeno producidos: 0.0009895 mol
- Moles de oxígeno producidos: 0.0004948 mol

Para verificar la relación de 2:1, dividimos la cantidad de moles de hidrógeno entre la cantidad de moles de oxígeno:

$$\frac{\text{Moles de Hidrogeno}}{\text{Moles de Oxigeno}} \quad (32)$$

$$\frac{0.0009895 \text{ moles}}{0.0004948 \text{ moles}} = 1.999 \approx 2 \quad (33)$$

El resultado es aproximadamente 2, lo que indica que hay aproximadamente el doble de moles de hidrógeno que, de oxígeno, cumpliendo así con la relación estequiométrica de 2:1 entre el hidrógeno y el oxígeno en la electrólisis del agua.

Para convertir moles a gramos, se necesitó conocer la masa molar del compuesto en cuestión, simplemente se multiplicó la cantidad de moles por la masa molar del compuesto.

- Hidrógeno (H_2): La masa molar del hidrógeno (H_2) es aproximadamente 2.016 g/mol .

$$\text{Masa de Hidrogeno}(g) = \text{Moles de Hidrogeno} \times \text{Masa molar de Hidrogeno} \quad (34)$$

$$\text{Masa de Hidrogeno}(g) = 0.0009895 \text{ moles} \times 2.016 \text{ g/mol} \quad (35)$$

$$\text{Masa de Hidrogeno}(g) = 0.001994 \text{ g} \quad (36)$$

- Oxígeno (O_2): La masa molar del oxígeno (O_2) es aproximadamente 32.00 g/mol .

$$\text{Masa de Oxígeno}(g) = \text{Moles de Oxígeno} \times \text{Masa molar de Oxígeno} \quad (37)$$

$$\text{Masa de Oxígeno}(g) = 0.0004948 \text{ moles} \times 16.00 \text{ g/mol} \quad (38)$$

$$\text{Masa de Oxígeno}(g) = 0.00079168 \text{ g} \quad (39)$$

Entonces, la cantidad de hidrógeno producido es aproximadamente 0.001997 g y la cantidad de oxígeno producido es aproximadamente 0.015808 g , y la cantidad total producida teóricamente sería la suma de estas dos,

$$C_T = 0.001997 + 0.015808 = 0.017805 \text{ g} \quad (40)$$

Una vez se obtuvo la cantidad teórica de producción por medio de electrolisis, y sabiendo que el producido es una relación 2:1 de Hidrogeno (H_2) y Oxigeno (O_2), se procedió a encontrar la cantidad real obtenida, esto con relación al Volumen (V_g). (Almora et al., 2022)

La fórmula general para esta conversión es:

$$\text{Masa}(g) = \text{Volumen de gas}(V_g) (mL) \times \text{Densidad}(\rho)(g/mL) \quad (41)$$

Para conocer la cantidad real de producción primero se debe convertir el volumen de gas (V_g) de mililitros (mL) a gramos (g), pero se necesita conocer la densidad del gas (ρ) a la temperatura (T) y presión (P) dadas. La densidad (ρ) del gas puede variar según las condiciones de temperatura y presión. Por lo tanto, es necesario conocer esta información específica para realizar la conversión con precisión. La temperatura (T) y su presión (P) serán 19°C y 2 atm respectivamente, la densidad (ρ) del hidrógeno es aproximadamente **0.08988 g/mL**. Con estos valores, simplemente se multiplica el volumen del gas (V_g) por la densidad para obtener la masa en gramos. (Rodriguez, 2023)

A temperaturas y presiones no estándar, se puede utilizar la siguiente ecuación para calcular la densidad del hidrógeno

$$\text{Densidad } (\rho) \left(\frac{g}{mL} \right) = \frac{\text{Masa molar } (g/mol)}{\text{Volumen molar } (L/mol)} \quad (42)$$

Donde la masa molar del hidrógeno es aproximadamente 2.016 g/mol , este valor es porque se encuentra en su forma estable, generalmente el valor de la masa molar del hidrogeno es de 1.008 g/mol , pero como se menciona, en su forma estable y existente, es un elemento que se encuentra exclusivamente como moléculas diatómicas, este caso homonucleares, la cual necesita estar enlazado por dos átomos de su mismo elemento, de forma contraria estaría en su forma natural. (Academia Lab., 2024)

Tomando en cuenta lo anterior, el volumen molar (V_m) del hidrógeno se refiere al volumen que ocupa un mol de hidrógeno. Se puede calcular utilizando la fórmula de estado de los gases ideales. (Academia Lab., 2024)

$$V_m = \frac{V_g}{n} \quad (43)$$

Donde,

V_m es el volumen molar.

V_g es el volumen total del gas.

n es la cantidad de sustancia, medida en moles.

Una de las formas de obtener la cantidad de moles de un gas es utilizando la ley de los gases ideales, que establece la relación entre la cantidad de sustancia, la presión, el volumen y la temperatura de un gas. (González et al., 2019)

$$PV_g = nRT \quad (44)$$

Donde,

P es la presión en atmósferas (atm).

V_g es el volumen en litros (L).

n es la cantidad de sustancia en moles (mol). Según paso anterior $2.016 g/mol$

R es la constante de los gases ideales, que es $0.0821 atm \cdot \frac{L}{(mol \times K)}$

T es la temperatura en kelvin (K).

Dado que se conoce el volumen ($V_g = (0.05 L)$), la temperatura ($T = (292 K)$), y la presión ($P = 2 (atm)$), se despeja n de la ecuación:

$$n = \frac{PV_g}{RT} \quad (45)$$

$$n = \frac{(2 atm) \times (0.05 L)}{(0.0821 \frac{atm \times L}{mol \times K}) \times (292 K)} \quad (46)$$

$$n = \frac{0.01}{(0.0821) \times (292)} \quad (47)$$

$$n = \frac{0.1}{23.97} \quad (48)$$

$$n = 0.004171 mol \quad (49)$$

Una vez se tiene la cantidad de sustancia en moles, se calcula el volumen molar:

$$V_m = \frac{V_g}{n} \quad (50)$$

$$V_m = \frac{0.05 L}{0.004171 mol} \quad (51)$$

$$V_m = \frac{0.05 L}{0.004171 mol} \quad (52)$$

$$V_m = 11.98753 L/mol \quad (53)$$

Seguido de esto obtenemos la densidad:

$$Densidad (\rho) \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{Masa molar (g/mol)}{Volumen molar (L/mol)} \quad (54)$$

$$Densidad (\rho) = \frac{2.016 (g/mol)}{11.98753 (L/mol)} \quad (55)$$

$$Densidad (\rho) = 0.1681 g/L \quad (56)$$

Y para finalizar, Teniendo la formula anteriormente explicada que es:

$$masa (g) = Volumen (L) \times Densidad(g/L) \quad (57)$$

$$masa (g) = 0.05 L \times 0.1681 (g/L) \quad (58)$$

$$masa (g) = 0.008409 g \quad (59)$$

La eficiencia del producto se calcula comparando la cantidad real de producto obtenida experimentalmente con la cantidad teórica de producto que se esperaría según los cálculos estequiométricos. En este caso, ya se encontró la cantidad teórica y real de producto. La eficiencia se expresa como un porcentaje y se calcula utilizando la fórmula. (F. A. Jiménez-Becerra , F. Oviedo-Tolentino , M. Loredó-Tovías, 2021)

$$Eficiencia (\%) = \left(\frac{Cantidad\ real}{Cantidad\ teórica} \right) \times 100 \quad (60)$$

$$Eficiencia (\%) = \left(\frac{0.0008409\ g}{0.017805} \right) \times 100 \quad (61)$$

$$Eficiencia (\%) = 47.22\% \quad (62)$$

Los resultados obtenidos reflejan una relación crucial entre la eficiencia del sistema y dos variables fundamentales: el suministro energético y la concentración del electrolito. Esta asociación resalta la importancia de optimizar estas variables para mejorar la eficiencia global del proceso de producción de hidrógeno.

En este análisis, se observa que la eficiencia del sistema está estrechamente ligada al suministro energético, el cual es esencial para su funcionamiento. La cantidad de energía proporcionada influye directamente en la capacidad del sistema para generar corrientes y voltajes óptimos, lo que a su vez impacta en la eficiencia del proceso.

Por otro lado, la concentración del electrolito emerge como un factor determinante en la eficiencia del sistema. Esta variable armoniza las corrientes y voltajes generados, lo que sugiere

que encontrar el equilibrio adecuado en la concentración del electrolito puede ser clave para maximizar la eficiencia del proceso de producción de hidrógeno.

Además, se destacó que, si se incrementa el volumen de producción y se reduce el consumo de energía de entrada, se llegaría a una mejora gradual en la eficiencia del sistema.

Al comprender y optimizar adecuadamente resaltó la importancia de buscar estrategias que permitan el suministro energético y la concentración del electrolito, así como al buscar formas de aumentar la producción sin aumentar el consumo de energía, se pueden lograr mejoras significativas en la eficiencia del proceso, lo que contribuirá a su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

Luego de obtener la eficiencia de producción de la celda de electrolisis, se procedió a hacer la comparación con respecto al cambio de electrolito. Como se mencionó anteriormente, se utilizó Cloruro de Sodio ($NaCl$) como alternativa del Hidróxido de Sodio ($NaOH$); aun sabiendo que la electroconductividad del Cloruro de Sodio en el proceso no alcanzo los estándares que estableció el Hidróxido de Sodio.

En este orden de ideas, se realizó la toma de datos con respecto a la corriente (I) que requirió y el tiempo (t) que demoro en producir la misma cantidad de hidrogeno. Para 50 mL de producción con Cloruro de Sodio como electrolito, se ocupó un tiempo (t) de 70 segundos con una corriente (I) de 5.6 A. Ahora bien, para conocer la eficiencia del segundo proceso, se realizaron los mismos pasos que con el Hidróxido de Sodio, y así conocer cuánto sería la producción teórica; para ello, se obtuvo la carga eléctrica (Q), según la corriente (I) y el tiempo (t). Para este caso en especifico $I = 5.6 A$ y $t = 70s$.

$$Q = I \times t \quad (63)$$

$$Q = 5.6 A \times 70 \text{ seg} \quad (64)$$

$$Q = 392 C \quad (65)$$

Una vez se tuvo la carga eléctrica (Q) (mismo proceso que con el Hidróxido de Sodio ($NaOH$)), se procedió a encontrar la cantidad de moles de electrones transferidos (n) (Brito Évora, 2006).

$$\text{Moles de electrones } (n) = \frac{Q}{F} \quad (66)$$

$$\text{Moles de electrones } (n) = \frac{392 C}{96485 C/mol} \quad (67)$$

$$\text{Moles de electrones } (n) = 0.004062 \text{ moles} \quad (68)$$

Con la cantidad de electrones (n), se aplicó la relación estequiométrica para el agua (H_2O),

Para Hidrogeno

$$\text{Moles de hidrogeno} = \frac{(\text{Moles de electrones})}{4} \times 2 \quad (69)$$

$$\text{Moles de Hidrogeno} = \frac{0.004062}{4} \times 2 \quad (70)$$

$$\text{Moles de Hidrogeno} = 0.002031 \quad (71)$$

Para Oxigeno

$$\text{Moles de Oxigeno} = \frac{(\text{Moles de electrones})}{4} \times 1 \quad (72)$$

$$\text{Moles de Oxigeno} = \frac{0.004062}{4} \times 1 \quad (73)$$

$$\text{Moles de Oxigeno} = 0.001015 \quad (74)$$

Para determinar si se cumplió la relación estequiométrica de 2:1 entre el hidrógeno y el oxígeno en la electrólisis del agua, nuevamente se necesitó comparar las cantidades de moles de hidrógeno y oxígeno que se han calculado (Regalado-Méndez et al., 2014), además de dividir la cantidad de moles de hidrógeno entre la cantidad de moles de oxígeno:

$$\frac{\text{Moles de Hidrogeno}}{\text{Moles de Oxigeno}} \quad (75)$$

$$\frac{0.002031 \text{ moles}}{0.001015 \text{ moles}} = 2 \quad (76)$$

El resultado es **2**, lo que indica que hay el doble de moles de hidrógeno que, de oxígeno, cumpliendo así con la relación estequiométrica de 2:1 entre el hidrógeno y el oxígeno. Por último, para saber la cantidad total de producción en gramos se hace uso de la masa molar de los dos compuestos.

$$\text{Masa de Hidrogeno}(g) = \text{Moles de Hidrogeno} \times \text{Masa molar de Hidrogeno} \quad (77)$$

$$\text{Masa de Hidrogeno}(g) = 0.002031 \text{ moles} \times 2.016 \text{ g/mol} \quad (78)$$

$$\text{Masa de Hidrogeno}(g) = 0.004094 \text{ g} \quad (79)$$

Y para el oxígeno,

$$\text{Masa de Oxigeno}(g) = \text{Moles de Oxigeno} \times \text{Masa molar de Oxigeno} \quad (80)$$

$$\text{Masa de Oxigeno}(g) = 0.001015 \text{ moles} \times 16.00 \text{ g/mol} \quad (81)$$

$$\text{Masa de Oxigeno}(g) = 0.01624 \text{ g} \quad (82)$$

La cantidad total producida teóricamente sería, $C_T = 0.004094 + 0.01624 = 0.020334 \text{ g}$.

Una vez se obtiene la cantidad teórica de producción por medio de electrolisis, y sabiendo que para esta producción también se presenta una relación 2:1 de Hidrogeno (H_2) y Oxigeno (O_2), se procede a encontrar la cantidad real obtenida, esto con relación al Volumen (V_g) (Almora et al., 2022). Sin embargo, como se estandarizó la medición de cuánto tiempo pasa para producir 50 mL, la producción real se mantiene, pues en sus cálculos, la variable que afecta directamente es el volumen del gas (V_g). Comprendido esto simplemente se tomó el valor de la producción real anterior y lo se lo dividió sobre la producción teórica con respecto a los datos del Cloruro de Sodio (N_aCl) así,

$$Eficiencia (\%) = \left(\frac{Cantidad\ real}{Cantidad\ teórica} \right) \times 100 \quad (83)$$

$$Eficiencia (\%) = \left(\frac{0.0008409\ g}{0.020334\ g} \right) \times 100 \quad (84)$$

$$Eficiencia (\%) = 4.13\% \quad (85)$$

Concluido el proceso, los resultados reflejan un eficiencia mayor del Hidróxido de Sodio (N_aOH) con respecto al Cloruro de Sodio (N_aCl), en relación con el tiempo, carga eléctrica y esto directamente relacionado a la eficiencia de producción. Lo previo debido a que la diferencia es de aproximadamente 40%, además de que la celda de producción de hidrógeno no presentó alteraciones que el Cloruro de Sodio si llevo a tener.

5. Análisis y discusión de resultados

En este último capítulo, se abordó la resolución del objetivo general, donde se presentó un análisis y se evaluó basado en los resultados obtenidos, los parámetros establecidos, así como los cálculos para obtener la eficiencia. Este enfoque permite realizar un estudio de los resultados de la producción de hidrogeno, evaluando su comportamiento ante diferentes parámetros, como se planteó en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

5.1 Comparación de electrolito con respecto a la electro conductividad.

De acuerdo, a los resultados de las dos alternativas observado anteriormente, se evidencia una capacidad superior de electroconductividad con el electrolito Hidróxido de Sodio ($NaOH$) respecto al Cloruro de Sodio ($NaCl$), teniendo como resultado los siguientes datos:

Tabla 7

Comparación de electroconductividad del Hidróxido de Sodio ($NaOH$) y Cloruro de Sodio ($NaCl$).

	<i>Electrolito</i>	
	NaOH	NaCl
<i>Electroconductividad ($\mu s/cm$)</i>	6400	2140
	6225	2160
	6010	2180
	5980	2160
	6000	2160
	6420	2165
	5990	2170
	6010	2140
	6350	2180
	6400	2160

Considerando el objetivo fundamental de mejorar los parámetros que impactan positivamente en la producción de hidrógeno, se hace decisivo la elección del electrolito más apto para el proceso. En este contexto, se ha determinado que el hidróxido de sodio ($NaOH$) se presenta

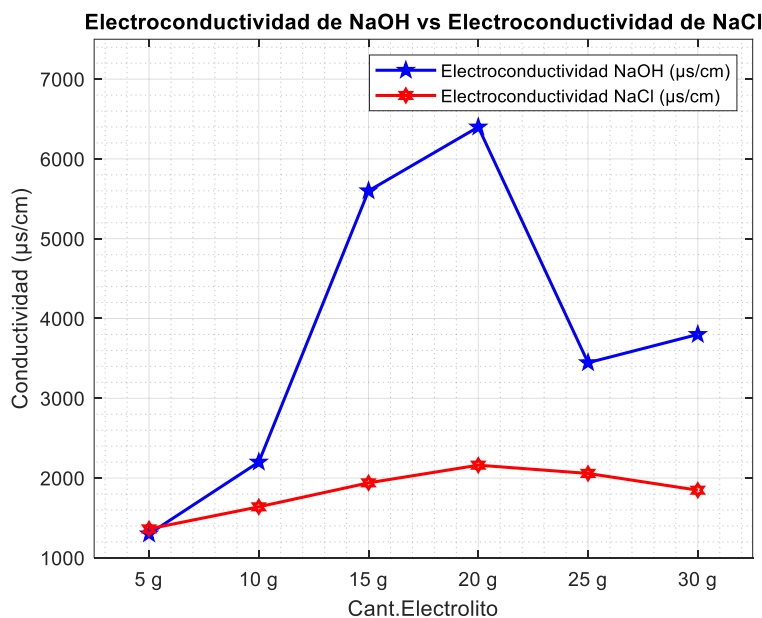
como la opción más favorable. Esta elección se basa en la evidencia previa presentada, la cual destaca una mayor conductividad eléctrica en comparación con otros electrolitos disponibles. Por tanto, al seleccionar el NaOH como electrolito, se busca potenciar de manera óptima la eficiencia y el rendimiento del proceso de producción de hidrógeno.

5.2 Saturación del electrolito dependiendo de su concentración.

Después de llevar a cabo una serie de pruebas con diversos electrolitos, se ha observado que la electroconductividad exhibe una dependencia de la cantidad de materia (en gramos) proporcionada a la celda. Estos resultados muestran que la relación entre la cantidad de electrolito y la electroconductividad no sigue una tendencia lineal, sino que presenta un punto de inflexión donde se evidencia una saturación (ver figura 17). Es decir, tras alcanzar cierto nivel de concentración, agregar más electrolito al agua no conlleva un aumento significativo en la electroconductividad, sino más bien, llega a reducirla.

Figura 17

Comparación de electro conductividad entre NaOH y NaCl



Este análisis reviste una importancia decisiva, ya que proporciona un parámetro fundamental para mejorar el proceso de producción de hidrógeno. Al identificar el punto de saturación y determinar la cantidad óptima de electrolito que debe agregarse a la celda, se puede garantizar mejorar eficiencia en términos de electroconductividad. Este enfoque estratégico, al favorecer una mayor eficiencia en la producción de hidrógeno.

5.3 Evaluación de las diferentes eficiencias con respecto al electrolito.

En este punto se obtiene un resultado que da respuesta al objetivo general el cual evalúa la producción de hidrogeno respecto al porcentaje de eficiencia (como se expone en la tabla 8) que tiene el proceso de obtención de hidrogeno mediante el método de electrolisis. Al llegar a esta etapa, se puede observar materializado los resultados del presente proyecto investigativo, presentando un porcentaje de eficiencia.

Tabla 8
Relación de resultados para cada electrolito

		Electrolito		
		NaOH	NaCl	
Aspectos	Cant. (g)	15		
	Voltaje (V)	5	4,3	
	Corriente (A)	3,91	5,6	
	Tiempo(s)	39	70	
	Producción	Teórica (g)	0,017805	0,020334
		Real (g)	0,008409	
	Eficiencia (%)	47,22	4,13	

Al analizar en detalle el desempeño del proceso, se concluye que el resultado obtenido se basa en la minuciosa definición y seguimiento de los parámetros clave, los cuales han sido rigurosamente establecidos a lo largo de la investigación. Cada uno de estos parámetros ha sido seleccionado con sumo cuidado.

Al registrar un valor de eficiencia del 47.22%, se evidencia un notable acercamiento al nivel de eficiencia propuesto en la hipótesis, que es del 48%. Este resultado demuestra un desempeño significativo y cercano a la meta establecida. Y con ello se confirma la validez de la hipótesis alternativa, que sugiere un rango de eficiencia del 30% al 50%, que está respaldada por el valor obtenido, indicando que el sistema o proceso evaluado está operando dentro de los parámetros esperados.

En resumen, aunque el resultado no cumple completamente con la expectativa inicial pero se acerca demasiado, sí valida la hipótesis alternativa y proporciona información útil para futuras mejoras en la eficiencia del sistema o proceso evaluado.

Conclusiones

En primer lugar, es necesario destacar la importancia de optimizar el diseño de la celda de electrolisis para garantizar una eficiencia máxima. Este proceso crucial implica una cuidadosa selección de materiales para los electrodos, donde el uso de acero inoxidable se destaca por su excelente resistencia a la corrosión, siendo un factor relevante para mantener la integridad estructural de la celda a lo largo del tiempo. Además, el diseño de la celda genera un impacto considerable en su rendimiento, especialmente en lo que respecta a la distribución de los electrodos. Al priorizar un área de ánodo (-) mayor que la del cátodo (+), se logran resultados favorables al aumentar la concentración de separación en hidrógeno, el cual es el objetivo, mientras que al mismo tiempo se realizan cambios los cuales reducen las pérdidas de presión, lo que contribuye a mejorar la eficiencia general del diseño de la celda de electrólisis.

Durante el desarrollo del proceso, se llevó a cabo una evaluación total del uso de diferentes electrolitos, como lo son el hidróxido de sodio (NaOH) y cloruro de sodio (NaCl), debido a sus propiedades conductoras de electricidad. Aunque el NaCl es más económico y ampliamente disponible, se observaron efectos adversos durante su aplicación inicial en la celda debido a su alta corrosividad y menor conductividad en comparación. Esta corrosión no solo afectó los elementos que conforman la celda de electrólisis, sino que también tuvo un impacto visible en la coloración y desprendimiento de residuos del agua utilizada en el proceso. Por otro lado, el NaOH demostró ser una alternativa más favorable, ya que mostró una conductividad eléctrica significativamente mejorada así mismo como su menor grado de corrosión lo cual ayuda significativamente la sostenibilidad del proyecto. Se observó que las diferencias en las conductividades eléctricas entre los dos electrolitos eran notables, con el NaOH triplicando aproximadamente la conductividad del NaCl en la misma concentración. Este hallazgo subraya

la importancia de seleccionar cuidadosamente el electrolito adecuado para maximizar la eficiencia y la estabilidad del proceso de electrólisis.

Además, se identificó que la corriente y el voltaje, en relación con el tiempo, ejercen una influencia directa en la carga energética de la celda de electrólisis. Esta relación dinámica entre los parámetros eléctricos y el tiempo no solo determina la cantidad teórica de producción del producto deseado, sino que también afecta la eficiencia general del proceso. Por lo tanto, es crucial monitorear y ajustar cuidadosamente estos parámetros durante el funcionamiento de la celda para optimizar el rendimiento y maximizar su producción.

En resumen, el diseño y la operación eficientes de una celda para producción de hidrogeno mediante electrolisis son fundamentales para garantizar una producción rentable y sostenible. La selección adecuada de materiales, la distribución óptima de electrodos, la energía de entrada suministrada y la elección del electrolito adecuado son aspectos que deben considerarse para alcanzar los objetivos de eficiencia y sostenibilidad del producto.

Recomendaciones

Para garantizar la seguridad durante el proceso de extracción de hidrógeno por electrólisis, es crucial implementar medidas específicas en varias áreas clave. En primer lugar, es fundamental establecer un estricto control y monitoreo de los parámetros operativos, como la corriente, el voltaje y la temperatura, así como optimizar el diseño al hacerlo lo más hermético posible para asegurar su eficiencia y estabilidad. Esto no solo asegura condiciones óptimas de operación, sino que también permite detectar y abordar cualquier problema que pueda representar un riesgo para la seguridad. Además, se deben aplicar medidas absolutas de seguridad, como la provisión de equipos de protección personal adecuados y la implementación de este proceso en lugares con ventilación y que presenten un control de gases en el entorno de trabajo para prevenir la acumulación de gases inflamables o tóxicos. Por último, es esencial cumplir con todas las regulaciones y normativas de seguridad pertinentes para garantizar un entorno seguro y protegido para todo el personal involucrado en el proceso ya que estamos manipulado hidrogeno un gas con alto índice de explosión. Al priorizar la seguridad en todas estas áreas, se puede minimizar de manera efectiva cualquier riesgo asociado con el proceso de extracción de hidrógeno por electrólisis.

Trabajos futuros

Producción de hidrogeno verde mediante el proceso de electrolisis con energías renovables como fuente de entrada. Esto se enfoca a la utilización de fuentes como paneles solares, energía eólica, etc. Fuentes que sean rentables en el lugar donde se realice.

Aplicación del hidrogeno como biogás para motores de combustión. Es decir la aplicación de la celda de hidrogeno como fuente energética reemplazando a la gasolina.

Adaptación de combustible en base a hidrogeno para motobombas y cortadoras de césped. Esto basándonos en el remplazo de hidrocarburos comunes como la gasolina o el Diesel.

Producción de hidrogeno verde mediante el proceso de electrolisis asistido por ultrasonido. Esto queriendo mejor el tiempo de producción así mismo como la eficiencia, al poder separar las moléculas de hidrogeno del acero inoxidable de una forma más rápida.

Análisis de producción de hidrogeno con sonoquímica. Son tecnologías relativamente nuevas que se requiere un análisis y estudio previo para optar en la realización de este tipo de proyectos.

Construcción y comparación de electrodos polares y bipolares para la producción de hidrogeno mediante el proceso de electrolisis. Esto gracias a que la electrolisis se puede realizar de diferentes maneras y así poder obtener diferentes datos y realizar su comparación para saber cuál es más eficiente.

Calentadores químicos utilizando el hidrogeno como biogás. Gracias al poder calorífico del hidrogeno y al gran consumo de gas para la calefacción, se hace una idea atractiva ya que se puede rebajar costos y tener un poder calorífico superior a la utilización común de gas fósil para este tipo de aplicación

Referencias

- Aguirre Guevara, O. A. (2013). *Celdas de hidrógeno y su potencial de aplicación*. 129.
- Castellanos, A., Chaparro, D., & Lozano, N. (2022). Hidrógeno Como Sustituto De Los Combustibles Fósiles En Colombia Para El Sector Automotriz. *Universidad De América*, 42.
- Castiblanco, O., & Cárdenas, D. J. (2020). Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 299.
- Academia Lab. (2024). *Volumen molar Gases ideales*. Enciclopedia. <https://academia-lab.com/enciclopedia/volumen-molar/>
- Almora, E., Campa, C., & Rodríguez, E. (2022). Correlación Granulometría-Densidad de los polvos de hojas secas de Moringa oleifera de diferentes tamices. *Tecnología Química*, 42(1), 131–141. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852022000100131&lng=es&nrm=iso
- Brito Évora, F. (2006). Apuntes sobre el concepto de equivalente químico. *Canales de La Real Sociedad Española de Química*, 102(3), 41–42.
- Bustamante, G. (2013). Revista de Actualización Clínica Volumen 39 2013 ELECTROLITOS. *Revista de Actualización Clínica Volumen 39*, 39(1), 2017–2022. <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/raci/v39/v39a01.pdf>
- F. A. Jiménez-Becerra , F. Oviedo-Tolentino , M. Loredó-Tovías, M. A. G. (2021). *Tema A4 Termofluidos : Transformación de la energía “ Estudio Experimental de la Producción de Hidrógeno en una Celda Electrolítica Alcalina .”* 186–193.
- González, P., Tajuelo, Á., Vara, A., & Jaramillo, P. (2019). La Ley De Los Gases Ideales Y La Gran Explosión. *Meridies*, 22, 43–48.
- Herradón, B. (2011). *El hidrógeno: ¿futura fuente de energía?*
- Innovation Atria. (2023). *Caracterización de materiales: ¿Qué técnicas se utilizan?*

- Caracterización, Materiales. <https://www.atriainnovation.com/caracterizacion-de-materiales-tecnicas/>
- Kilner, J. (2022). *Métodos de producción de hidrógeno y sus colores*. CIC EnergiGUNE. <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>
- Mantilla, R., Mauricio, A., Fajardo, Q., & Elisa, M. (2015). *Desarrollo de un prototipo para la producción de Hidrógeno a partir de electrolisis Investigación Terminada*. 184–189.
- Montes, O. F., Garcés, R. S., Reyes Reyes, F. A., Robledo, P. D. C. Z., López, F. H. E., & Calderón, F. A. (2016). Comportamiento a la corrosión del acero API X70 soldado por el proceso de doble arco sumergido inmerso en diferentes medios corrosivos. *Soldagem e Inspecao*, 21(2), 172–184. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2102.07>
- Mosquera, S. C., Molina, S. G., Gonzalez, M. H., Salazar, R. N., Murillo, J. P., & Chacón, M. R. (2019). Ley De Conservación De La Masa: De La Alquimia a La Química Moderna. Antoine Laurent Lavoisier. *Cultura Científica Para La Enseñanza Secundaria*, 8. <http://hdl.handle.net/20.500.12466/277>
- Na, D. E. C., & Hipertensiva, C. (2019). *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title*. 6–8.
- Regalado-Méndez, A., Delgado-Vidal, F. K., Martínez-López, R. E., & Peralta-Reyes, E. (2014). Balanceo de ecuaciones químicas integrando las asignaturas de química general, álgebra lineal y computación: Un enfoque de aprendizaje activo. *Formacion Universitaria*, 7(2), 29–40. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062014000200005>
- Rodriguez, D. (2023). *¿Cómo convertir gramos a mililitros?* <https://citeia.com/recomendacion/tutorial/como-convertir-gramos-a-mililitros>
- Técnicas Reunidas. (2022). *Presente y futuro del hidrógeno. Parte 2*. Técnicas Reunidas.

- <https://www.tecnicasreunidas.es/es/articulo/presente-y-futuro-del-hidrogeno-part-2/>
- Vargas, P. (2021). Análisis del costo de producción del hidrógeno verde en la zona del Caribe colombiano, una aplicación al sector Industrial. *Pontificia Universidad Javeriana*, 40.
- Venegas, D., Meléndrez, M., Celi, S., Ayabaca, C., Transversal Alberto Einstein, Q., & Ecuador santiagoceli, Q. (2016). Métodos amigables de producción de hidrógeno como fuente de energía limpia. *II Jornadas Iberoamericanas de Motores Térmicos y Lubricación (MTL 2016)*, i, 333–344.
- Vermeersch, J. I. (2018). *Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua*. 59. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152701>
- 311. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.86466>
- Gimenez, J. C. (2019). Hidrogeno Verde. *Especial Hidrógeno*, 153, 7.
- Godula-Jopek, A. (2015). *Hydrogen Science and Electrochemical Science and Technology – Fundamentals Electrochemical Technologies for Energy Storage and Fuel Cell Science and High Energy Density Lithium*. 117–167.
- Hidrógeno, E. L., & Futuro, C. D. E. L. (1968). Laboratory requirements and the future of medical technologists. A summary report of the National Conference on Manpower. *Hawaii Medical Journal*, 27(5), 468–469.
- IEA. (2022). *HIDROGENO*. París. <https://www.iea.org/reports/hydrogen>, Licencia: CC BY 4.0
- Kazimierski, M. A. (2021). Hidrógeno verde en Argentina ¿un nuevo orden extractivo? *Huellas*, 25(2), 103–118. <https://doi.org/10.19137/huellas-2021-2521>
- Mantilla, R., Mauricio, A., Fajardo, Q., & Elisa, M. (2016). *Desarrollo de un prototipo para la producción de Hidrógeno a partir de electrolisis Investigación Terminada*.

- Miller, H. A., Bouzek, K., Hnat, J., Loos, S., Bernäcker, C. I., Weißgärber, T., Röntzsch, L., & Meier-Haack, J. (2020). Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: A review of recent developments in critical materials and operating conditions. *Sustainable Energy and Fuels*, 4(5), 2114–2133. <https://doi.org/10.1039/c9se01240k>
- Mokate, K. M. (2001). Eficacia, eficiencia, equidad y sostenibilidad: ¿Qué queremos decir? Karen Marie Mokate Departamento. *Departamento de Integración y Programas Regionales Instituto Interamericano para el Desarrollo Social*, 59.
- Poveda, M. (2007). Eficiencia Energética : Recurso No. *Olade*, 1–19.
- Programa de Ingeniería Electronica, U. C. (2015). *Líneas y Sublíneas de Investigación Ingeniería Electrónica*.
- Quijano, Vodniza, A. (2009). *GUIA DE INVESTIGACION CUANTITATIVA_CESMAG*.
- Quintela, R. (2000). 3. *Corriente eléctrica*.
- Vargas, P. (2021). Análisis del costo de producción del hidrógeno verde en la zona del Caribe colombiano, una aplicación al sector Industrial. *Pontificia Universidad Javeriana*, 40.
- Vermeersch, J. I. (2018). *Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua*. 59.
- Yolanda, B., & Soria, M. (2006). *El hidrógeno y la energía*.

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 06/MAR/2024

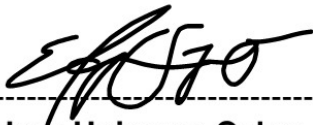
San Juan de Pasto, 06 de Marzo del 2024

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto


Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado Construcción de una celda para la producción de hidrogeno verde mediante el proceso de electrolisis, presentado por el (los) autor(es) Santiago Felipe Benavides Bastidas y Daniel Felipe Medina del Programa Académico Ingeniería Electrónica al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,




Edgar Unigarro Calpa
1085266351
Correo electrónico: eaunigarro@unicesmag.edu.co
Numero de contacto: 3182969880

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VISILADA MIREDCUCIÓN</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 01/MAR/2024

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Santiago Felipe Benavides	Documento de identidad: 1193473072
Correo electrónico: piipebenavides@gmail.com	Número de contacto: 3172602742
Nombres y apellidos del autor: Daniel Felipe Medina Rondon	Documento de identidad: 1004235140
Correo electrónico: df.medina02@gmail.com	Número de contacto: 3107604412
Nombres y apellidos del asesor: Edgar Unigarro Calpa	Documento de identidad: 1085266351
Correo electrónico: eaunigarro@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 3182969880
Título del trabajo de grado: Construcción de una celda para la producción de hidrogeno verde mediante el proceso de electrolisis.	
Facultad y Programa Académico: Ingeniería, Ingeniería electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el termino en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve(mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje(mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MREDCACIÓN</p>	<p>AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL</p>	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 01/MAR/2024

ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndola indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.




- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los __06__ días del mes de marzo del año __2024__

	
Nombre del autor: Santiago Felipe Benavides	Nombre del autor: Daniel Felipe Medina
 Nombre del asesor: Edgar Unigarro	