



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**Condiciones de operación de un reactor de
laboratorio para generar hidrógeno por medio
de electrólisis de agua con pH básico**

Tesis que obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

EN

INGENIERÍA QUÍMICA

presenta

Ing. Uriel Gómez Rodríguez

Línea de investigación: Ingeniería de Procesos Sostenibles

Director: Dr. Rafael Maya Yescas

Co-Directora: Dra. Gladys Jiménez García

Morelia, Michoacán de Ocampo, Mayo 2026.

RESUMEN

La búsqueda de una producción eficiente de hidrógeno verde mediante la electrólisis de agua con pH básico (AWE) es un aspecto importante de la transición a las energías limpias. La reacción de evolución del hidrógeno (HER) en medios básicos es fundamental para este proceso, y el rendimiento de los electrocatalizadores es un factor determinante para la eficiencia general. El principio operativo de las AWE implica la conducción de iones a través de un electrolito líquido entre dos electrodos. El agua es el compuesto que contiene hidrógeno de forma abundante en la Tierra, y para la HER es necesario acidificarla o aumentar el pH. Aprovechando que, durante el lavado final en la elaboración de biodiesel (combustible alternativo), por la vía homogénea básica se generan como residuo aguas con pH elevado, que provocan gastos y dificultades para su tratamiento y desecho, se propone valorizar estas aguas utilizándolas como materia prima para generar hidrógeno verde, utilizando energías solar y eólica como fuentes de energía renovable. Las desventajas son sus bajas densidades de corriente y la imposibilidad de operar con energías renovables intermitentes, fuentes de energía y cinética lenta. Estas limitaciones están asociadas con las primeras versiones de electrolizadores atmosféricos diseñados para operación continua en sitios industriales con fuentes de electricidad estables y económicas. Esta revisión resume el efecto de alguno de los factores que intervienen durante la HER, incluidos el material de los electrodos, el potencial eléctrico, la concentración de hidróxido de sodio en la solución y la temperatura de la solución, así mismo el efecto de algunos catalizadores propuestos, teniendo como factores de respuesta el tiempo para la HER y el gasto energético.

Palabras clave: Electrólisis de agua con pH básico, Reacción de evolución del hidrógeno (HER), Gasto energético.

ABSTRACT

The search for efficient green hydrogen production through basic water electrolysis (AWE) is a key aspect of the clean energy transition. The hydrogen evolution reaction (HER) in basic media is fundamental to this process, and the performance of the electrocatalysts is a determining factor for overall efficiency. The operating principle of AWE involves the conduction of ions through a liquid electrolyte between two electrodes. Water is the most abundant hydrogen-containing compound on Earth, and for HER, it is necessary to acidify it or increase its pH. Given that, during the final washing stage of biodiesel production (an alternative fuel), the basic homogeneous process generates water with a high pH as a byproduct, which causes costs and difficulties in its treatment and disposal, this project proposes to valorize this water by using it as a raw material to generate green hydrogen, utilizing solar and wind energy as renewable energy sources. The disadvantages are their low current densities and the inability to operate with intermittent renewable energy sources and slow kinetic energy. These limitations are associated with early versions of atmospheric electrolyzers designed for continuous operation in industrial sites with stable and inexpensive electricity sources. This review summarizes the effect of some of the factors involved in the HER (Energy Reduction Efficiency), including electrode material, electrical potential, sodium hydroxide concentration in the solution, and solution temperature, as well as the effect of some proposed catalysts, considering HER time and energy expenditure as response factors.

Keywords: Basic water electrolysis, Hydrogen evolution reaction (HER), Energy expenditure.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis y que me acompañaron durante este proceso académico y personal.

En primer lugar, agradezco a mis asesores Rafael Maya Yescas y Gladys Jiménez García por compartir sus conocimientos, orientación y experiencia, así como por el tiempo y la paciencia brindados durante el desarrollo de esta investigación. Sus observaciones y recomendaciones fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Agradezco también a la institución educativa por proporcionarme las herramientas, instalaciones y el apoyo necesario para llevar a cabo este proyecto de investigación.

De manera especial, agradezco a mi familia por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante. Gracias por acompañarme en cada etapa, por impulsarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles y por confiar siempre en mí.

A mis amigos y compañeros, gracias por su apoyo, consejos y por compartir conmigo experiencias que hicieron más llevadero este camino académico.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de esta tesis y a mi formación profesional y personal.

Este logro también les pertenece.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	2
1.3. Planteamiento del problema	3
1.4. Hipótesis.....	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. General	4
1.5.2. Particulares	4
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Cambio climático	7
2.2. Reducción de emisiones GEI.....	9
2.3. Combustibles alternos.....	10
2.4. Separación electrolítica del agua	10
Electroquímica	11
Transformadores de sustancia (sistemas electrolíticos)	13
Celdas electrolíticas	14
Conducción eléctrica	18
Corrosión (sistemas autodestructores).....	24
Electrolizadores a base de níquel	25
Modelos de sistemas de separación de agua	27
2.5. Usos del hidrógeno	33
3. METODOLOGÍA	35
3.1. Experimentación	35
3.2. Balances de masa	37
3.2.1. Análisis de grados de libertad.....	37
3.2.2. Datos independientes	38
3.2.3. Ecuaciones de balances de masa.....	38
3.2.4. Términos de acumulación de los balances de masa	39

3.3. Diseño de experimentos	41
3.4. Desarrollo de las etapas del proyecto	42
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1. Pruebas exploratorias	43
4.2. Experimentación usando los factores ajustados	52
5. CONCLUSIONES.....	67
Referencias bibliográficas	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Gases de invernadero más abundantes en la atmósfera. a) Potencial, b) longevidad, tomando como referencia al CO ₂	7
Figura 2.2. Emisiones relativas de gases de efecto invernadero a la atmósfera.	8
Figura 2.3. Acumulación de dos de los gases de efecto invernadero más importantes (Adaptado de U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020).	8
Figura 2.4. Representación de una interfase electrificada de cobre metálico, agua ionizada.	12
Figura 2.5. Representación de un electrodo de cobre metálico, iones cúpricos.	13
Figura 2.6. Representación de un sistema transformador de sustancia (electrolizador).	14
Figura 2.7. Representación de las reacciones de electrooxidación en el ánodo de un sistema productor de sustancia (electrolizador).	15
Figura 2.8. Representación de las reacciones de electrorreducción en el cátodo de un sistema productor de sustancia (electrolizador).	15
Figura 2.9. Diagramas de volcán según el principio de Sabatier.....	17
Figura 2.10. Conductividad eléctrica de diferentes soluciones según el laboratorio Bürkert Fluid Control Systems.	20
Figura 2.11. Conductividad electrolítica específica calculada en función de las concentraciones electrolíticas de soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH) a diferentes temperaturas.	21
Figura 2.12. Sistema de electrolizador de agua con pH básico.....	23
Figura 2.13. Representación de las reacciones de electrooxidación y electrorreducción en un sistema corrosivo (autodestructor).	24
Figura 2.14. Dependencia del tipo volcánico entre la densidad de corriente de intercambio y la fuerza del enlace Me-H.	26
Figura 2.15. Esquema del proceso de un sistema de energía de hidrógeno. ...	30
Figura 2.16. Escenarios para la electrólisis de agua con pH básico basado en energía fotovoltaica y energía fotovoltaica + almacenamiento.	32
Figura 2.17. Clasificación del hidrógeno según su procedencia según el consejo de eficiencia energética de norte américa.	33
Figura 3.1. Pasos para la electrólisis en laboratorio.....	36

Figura 3.2. Esquema de electrolizador de laboratorio.	37
Figura 3.3. Diagrama de Flujo Lógico de la Metodología de la Investigación. ..	42
Figura 4.1. Electrolizador Tipo Hoffman modificado (modelo 1)	43
Figura 4.2. Electrolizador tipo Hoffman modificado (modelo 2).	44
Figura 4.3. Comparación de la producción de hidrógeno en 15 minutos (SS316, Ni y Co).	49
Figura 4.4. Comparación de la producción de hidrógeno en 15 minutos (SS316-roscado y SS316).	50
Figura 4.5. Comparación de la producción de hidrógeno en 15 min con agua potable y agua destilada (SS316-roscado).	51
Figura 4.6. Diagrama Pareto de efectos estandarizados.	55
Figura 4.7. Graficas de residuos.	56
Figura 4.8. Grafica de efectos principales.	56
Figura 4.9. Grafica de contorno (Voltaje vs NaOH).	57
Figura 4.10. Grafica de contornos (Voltaje vs Temperatura).	57
Figura 4.11. Grafica de contornos (NaOH vs Temperatura).	58
Figura 4.12. Comportamiento del pH durante la experimentación.	58
Figura 4.13. Comportamiento del pH durante la experimentación.	59
Figura 4.14. Grafica de eficiencias energéticas (Kwh/L).	61
Figura 4.15. Tendencia del gasto energético.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tabla de conductividad y resistividad de algunos materiales.	18
Tabla 2.2. Producción mundial de hidrógeno frente a demanda (2024-2030). 28	
Tabla 3.1. Datos independientes para el balance de masa.	38
Tabla 3.2. Balances de masa en forma de tabla de moles.	38
Tabla 3.3. Esquema codificado del diseño factorial 2^3	41
Tabla 3.4. Valores mínimos y máximos de cada factor.	41
Tabla 4.1. Propuestas de materiales a utilizar durante la electrólisis.	45
Tabla 4.2. Resultados de la producción de hidrógeno (Co-SS316).	47
Tabla 4.3. Resultados de la producción de hidrógeno (Ni-SS316).	47
Tabla 4.4. Resultados de la producción de hidrógeno (SS316-SS316).	48
Tabla 4.5. Influencia del hidróxido de sodio en agua potable y agua destilada antes y después del proceso de electrólisis.	51
Tabla 4.6. Producción de hidrógeno.	52
Tabla 4.7. Coeficientes codificados.	52
Tabla 4.8. Resumen del modelo.	53
Tabla 4.9. Análisis de Varianza.	53
Tabla 4.10. Ecuación de regresión de unidades no codificadas.	54
Tabla 4.11. Ajustes y diagnóstico para observaciones poco comunes.	54
Tabla 4.12. Comparativa entre la eficiencia energética y el tiempo de producción de gas.	60

1. INTRODUCCIÓN

La gran demanda energética global actual, y la elevada generación de gases de efecto invernadero, ha motivado la búsqueda de energéticos alternativos, como lo es el hidrógeno verde. El hidrógeno es un vector energético con alto contenido específico de energía, 145 MJ/kg. El agua es el compuesto que contiene hidrógeno de forma abundante en la Tierra, y para la separación del hidrógeno y el oxígeno se requiere disminuir y aumentar el pH de la solución considerablemente. Aprovechando que durante el lavado final en la elaboración de biodiesel se generan como residuo aguas con pH elevado, se propone utilizarlas como materia prima para generar hidrógeno verde, utilizando energía solar como fuente de energía renovable (Qusay Hassan, 2023).

1.1. Antecedentes

La electrólisis del agua con pH básico ha surgido como una tecnología prometedora para la producción de hidrógeno, impulsada por la necesidad global de fuentes de energía renovables y sostenibles (Turner, 2004). Este método utiliza una solución con pH básico como electrolito y requiere una corriente eléctrica para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno (Kai Zeng, 2010).

Desde su desarrollo inicial, esta técnica ha sido objeto de numerosas investigaciones orientadas a mejorar la eficiencia del proceso y reducir los costos asociados. Los estudios previos han demostrado que factores como la composición del electrolito, la temperatura de operación, la superficie y composición de los electrodos, y las condiciones de operación juegan un papel crucial en la eficiencia y la viabilidad económica de la electrólisis del agua con pH elevado (Kai Zeng, 2010).

Además, se ha investigado ampliamente el uso de diferentes catalizadores para aumentar la velocidad de reacción y reducir la sobretensión, mejorando así la eficiencia global del proceso. Estos avances han sido fundamentales para avanzar hacia sistemas de producción de hidrógeno más competitivos y sostenibles desde el punto de vista ambiental (Michael Ball, 2015).

Sin embargo, a pesar de los avances, aún existen desafíos técnicos y económicos que deben abordarse para alcanzar una implementación más amplia y efectiva

de la electrólisis del agua con pH básico como una tecnología de generación de hidrógeno a gran escala (Alexander Buttler, 2018)

1.2. Justificación

La búsqueda de fuentes de energía limpia y sostenible se ha convertido en una prioridad global debido a los desafíos ambientales y energéticos que enfrenta nuestro planeta. En este contexto, el hidrógeno emerge como una alternativa prometedora como vector energético debido a su alta densidad energética y su potencial para ser producido de manera renovable mediante electrólisis del agua. (Turner, 2004)

La electrólisis del agua, especialmente utilizando electrolitos con pH elevado, ofrece varias ventajas significativas: es un proceso que utiliza agua como materia prima, no produce emisiones directas de gases de efecto invernadero ni contaminantes locales, y puede ser alimentado con energía eléctrica proveniente de fuentes renovables como la solar o la eólica, potenciando así su carácter sostenible (Kai Zeng, 2010).

El objetivo principal de esta investigación es explorar y analizar los parámetros fundamentales que afectan la eficiencia y la economía de la generación de hidrógeno verde mediante la electrólisis del agua con pH básico. Se pretende investigar cómo variaciones en la composición del electrolito, la temperatura, y otros factores pueden optimizar el rendimiento del proceso y reducir los costos asociados.

Además, esta investigación se justifica por la necesidad de desarrollar tecnologías más eficientes y económicamente viables para la producción de hidrógeno verde, promoviendo así su integración efectiva en sistemas energéticos más amplios. Se busca contribuir al conocimiento científico existente y ofrecer recomendaciones prácticas que puedan ser implementadas en aplicaciones industriales y comerciales.

En resumen, esta investigación no solo busca avanzar en el entendimiento teórico de la generación de hidrógeno mediante electrólisis del agua con pH básico, sino también proponer soluciones prácticas y aplicables que impulsen el uso de esta tecnología sostenible en el panorama energético global actual.

1.3. Planteamiento del problema

A fin de generar hidrógeno verde a partir de electrólisis de agua con pH básico aumentando la velocidad su producción, mejorando de la eficiencia del proceso, y disminuyendo la demanda energética, se requiere evaluar el efecto de los diferentes factores que intervienen, tales como la intensidad de corriente, la temperatura, concentración de electrolito, el material en los electrodos y la cantidad de catalizador.

1.4. Hipótesis

SI se encuentra la región de operación adecuada en términos de concentración de electrolito, potencial eléctrico, material en los electrodos y cantidad de catalizador, ENTONCES se incrementarán la eficiencia y el rendimiento de la generación de hidrógeno verde mediante la reacción partir de electrólisis de agua con pH básico.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

Encontrar el intervalo en las condiciones de operación más eficiente para la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis de agua con pH básico, evaluando parámetros clave a fin de conocer la eficiencia energética, rendimiento del sistema y viabilidad técnica, contribuyendo al desarrollo de tecnologías sostenibles.

1.5.2. Particulares

P1. Seleccionar factores más influyentes durante el proceso de electrólisis en agua con pH básico y materiales que sean afines a la reacción de evolución del hidrógeno.

- Seleccionar los factores que intervienen durante la reacción electrolítica y medir la tasa y la cantidad de hidrógeno generado como respuestas.
- Identificar y seleccionar algún material para los electrodos, similar a los propuestos en la literatura, para la reacción de evolución del hidrógeno.
- Proponer o descartar el uso de un electrocatalizador suspendido en la solución, con materiales similares a los propuestos en la literatura, para la reacción de evolución del hidrógeno.
- Generar un diseño de experimentos factorial 2^3 para monitorear del efecto de la intensidad de corriente, la temperatura y la concentración de electrolito a utilizar, para estudiar su efecto en la velocidad de generación de hidrógeno.

P2. Proponer algún esquema estequiométrico para la separación por electrólisis del agua.

- Identificar las especies en el sistema reactivo.
- Proponer las rutas de reacción entre las entidades en el sistema reactivo.

P3. Desarrollar los balances de masa en un reactor de tanque agitado a escala laboratorio en donde se lleva a cabo la evolución de hidrógeno por medio de la electrólisis del agua.

- Cuantificar el volumen producido de hidrógeno en cada prueba experimental.
- Relacionar los balances de masa de las especies presentes en el medio de reacción con la producción de hidrógeno.

P4. Evaluar el gasto energético para cada prueba y encontrar las pruebas con mejor rendimiento.

- Cuantificar la cantidad de energía consumida en un tiempo determinado y compararlo contra la cantidad de hidrógeno producido.
- Estimar la eficiencia energética para la producción de un kilogramo de hidrógeno para tener un punto de comparación con los sistemas reales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cambio climático

El cambio climático es un fenómeno reconocido hace algunas décadas, cuyo impacto más negativo es que puede modificar la biodiversidad en la tierra (Gitay, 2002). Entre las causas identificadas de este fenómeno en los últimos 50 años, se encuentra la emisión a la atmósfera, sin cuidado, de gases de combustión y de otras actividades (Smithson, 2001). En 2017 el calentamiento global inducido por el hombre alcanzó aproximadamente 1°C por encima de los niveles de los años preindustriales (1850-1900), incremento que ha ido aumentando la temperatura del planeta 0.2°C por década (Masson-Delmotte V, 2018).

Los principales gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por combustión son H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , CFC y SF_6 (Masson-Delmotte V, 2018). La contribución al efecto invernadero de los diferentes gases está relacionada a su potencial (Figura 2.1a), su longevidad (Figura 2.1b), y su concentración en la atmósfera en algún momento dado (Figura 2.2).

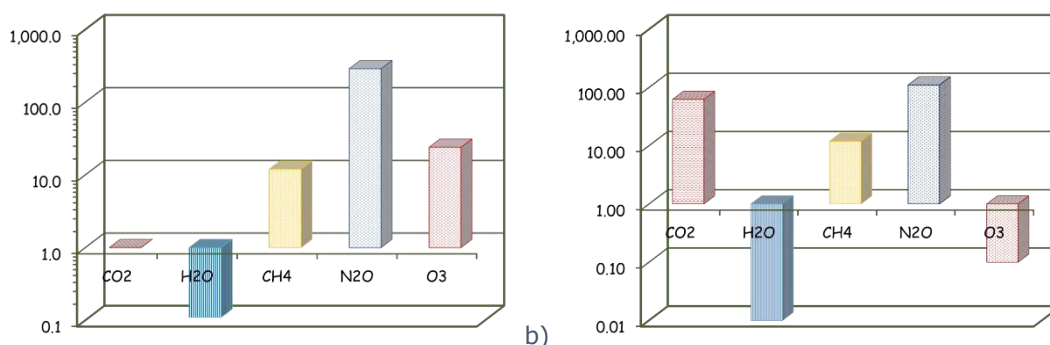


Figura 2.1. Gases de invernadero más abundantes en la atmósfera. a) Potencial, b) longevidad, tomando como referencia al CO_2 .

En este sentido, se considera al CO_2 el gas de efecto invernadero con las mayores emisiones antropogénicas, ya que es el que sigue del vapor de agua (Figura 2.2); representa aproximadamente el 75% del resto de las emisiones a nivel mundial (Cristina L. Archer, 2005).

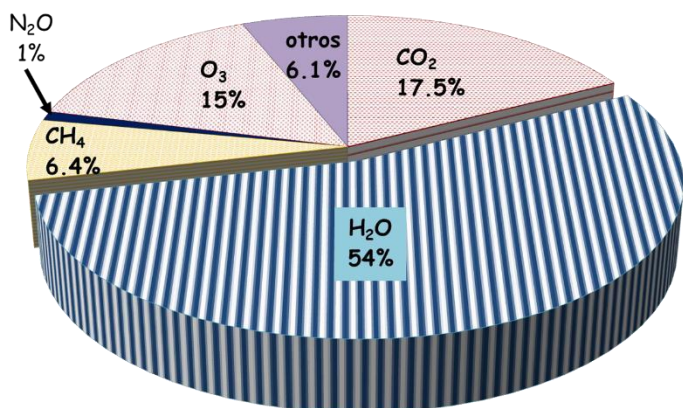


Figura 2.2. Emisiones relativas de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Esta consideración no está completa, ya que las emisiones de N₂O, aunque menores en cantidad que las de CO₂, provocan efecto invernadero de forma muy superior (Figura 2.3). Nótese que, en comparación con el CO₂, el N₂O exhibe potencial de efecto invernadero 200 veces mayor (o sea, 1 sola molécula de N₂O aporta más efecto invernadero que 200 moléculas de CO₂), y además su longevidad es 8 veces mayor (o sea, una molécula de N₂O emitida hoy, seguirá produciendo efecto invernadero dentro de 92 años, aproximadamente).

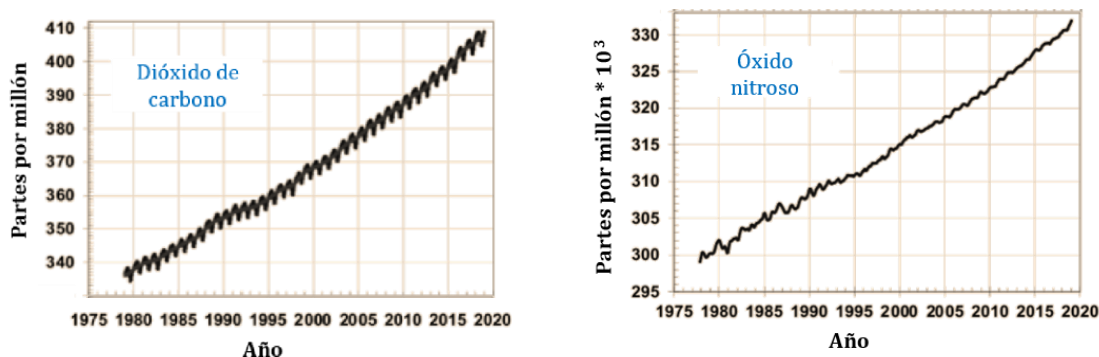
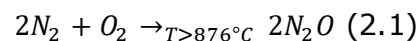


Figura 2.3. Acumulación de dos de los gases de efecto invernadero más importantes (Adaptado de U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020).

La formación de N₂O se da por la reacción entre oxígeno y nitrógeno atmosféricos (Ec. 2.1), cuando se alcanzan 876° C o temperaturas mayores. Estas condiciones de operación no son alcanzadas por los vehículos automotores, a quienes se culpa mayoritariamente del problema; sino por fuentes fijas de generación de energía, tales como las plantas carbo- y termo-eléctricas (Cole, 1994).



Por lo tanto, se acepta en general que es necesario reducir las emisiones de GEI, lo antes posible. En 1997, los participantes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, redactaron el acuerdo histórico conocido como el Protocolo de Kyoto (Breidenich, 1998). Después de su ratificación en 2005, sus disposiciones incluyen la reducción media del 5.2% de las emisiones de GEI de los 39 países más desarrollados, para el periodo {2008, 2012}, tomando como referencia los niveles de {1990}.

2.2. Reducción de emisiones GEI

Hasta ahora, las opciones tecnológicas para reducir las emisiones netas de GEI a la atmósfera se han centrado en:

- Reducir el consumo de energía al aumentar la eficiencia de la conversión y/o utilización de la energía.
- Cambiar a combustibles menos intensivos en carbono y más limpios; por ejemplo: hidrógeno, biocombustibles, energía eólica o energía nuclear.
- Secuestrar CO₂ al mejorar la capacidad de absorción biológica en bosques y suelos.

Está claro que ninguna opción tecnológica, por sí sola, proporcionará las reducciones de emisiones necesarias. Incluso, los esfuerzos adicionales de todas las soluciones anteriores probablemente no permitirán alcanzar los niveles deseados de emisiones de GEI (Robin, 2005).

Debe considerarse que las emisiones por combustión de energías de energéticos fósiles (gas, petróleo y carbón), energéticos que cubrirán más del 80% de la demanda de energía durante la primera parte del siglo XXI, aún no están listas para ser sustituidas por fuentes renovables, en el futuro cercano (Robin, 2005) (International Energy Agency, 2006), la reducción del 19% del nivel actual de emisiones de GEI podría, en este siglo, estabilizar el cambio climático a un costo razonable. Por lo tanto, el desarrollo de tecnologías para la producción de energía y materiales limpios, a partir de combustibles que no sean de origen fósil, constituye un intento factible para reducir las emisiones globales de GEI (Agency, 2008).

2.3. Combustibles alternos

La necesidad de disponer de combustibles alternos que puedan ayudar a mitigar los problemas ambientales causados por uso y abuso de combustibles fósiles son imperativos, ya que cerca del 98% de las emisiones de carbón a la atmósfera provienen de la quema de combustibles fósiles cuyo incremento intensifica la contaminación atmosférica, y consecuentemente el problema del calentamiento global causado.

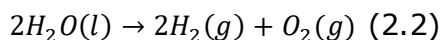
Otro problema de contaminación lo constituyen las partículas sólidas carbonosas de diámetro menor a $10\mu\text{m}$ y menores (conocidas como PM_{10}), las cuales provienen de la quema de diésel derivado del petróleo, en motores de combustión interna y plantas productoras de electricidad. La solución actual a este problema es la sustitución de este combustible por su equivalente de origen biológico, el biodiésel que proviene de compuestos verdes y se considera no tóxico y amigable con el ambiente (Balat, 2011). Biodiésel es la forma de definir a los ésteres de alquilo de ácidos grasos de cadena larga, derivados de fuentes renovables como los aceites vegetales o las grasas animales, obtenido al esterificar o transesterificar aceites o grasas con algún alcohol de bajo peso molecular, usualmente metanol o etanol. Dentro de las fuentes principales de aceite se encuentran soya, moringa, girasol, palma, ricino, camelina, sésamo, y otros (Adepoju, 2013).

2.4. Separación electrolítica del agua

Una de las principales motivaciones para producir hidrógeno molecular (H_2) es su función como vector energético, cuya densidad energética es $140 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, lo que lo convierte en alternativa ideal para el almacenamiento de energía limpia. La electrólisis del agua, la descomposición con ayuda de corriente eléctrica del agua (H_2O) en H_2 y oxígeno molecular (O_2), se considera un método limpio y eficiente de producción de H_2 , ya que no se generan subproductos y se pueden utilizar energías renovables; a diferencia del proceso de reformado, en el que se generan óxidos de carbono (CO_2 y CO).

Aunque la electrólisis del agua se conoce desde hace más de 200 años y proporciona H_2 de alta pureza (superior al 99.5%), representa menos del 1% de la cantidad total de H_2 producida cada año a nivel mundial (Angeles-Olvera Z,

2022). La reacción general para la electrólisis del agua se muestra en la ecuación (2.2).



El trabajo eléctrico necesario para la electrólisis del agua según la ecuación (2.2) a temperatura y presión estándar se da por el cambio en la energía libre, $\Delta G_r^0 = 237.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Este valor marca el límite termodinámico inferior de la energía necesaria para producir hidrógeno, que en términos prácticos equivale a 33 kWh por 1 kg de hidrógeno, a 1.23 V. En el mejor de los casos, la energía eléctrica consumida por un electrolizador es de aproximadamente 50 kWh, lo que corresponde a una eficiencia del 66%. El intervalo típico de voltajes de funcionamiento es de 1.60 a 2.00 V (Angeles-Olvera Z, 2022).

Electroquímica

La electroquímica es la parte de la química que trata del uso de las reacciones químicas para producir electricidad y el uso de la electricidad para producir cambios químicos. Es decir, estudia la conversión entre la energía eléctrica y la energía química. Los procesos electroquímicos son reacciones redox, en las cuales la energía liberada por una reacción espontánea se convierte en electricidad; o viceversa, la energía eléctrica se aprovecha para provocar una reacción química no espontánea. La construcción de las baterías, la electrodeposición y la corrosión de metales son ejemplos que involucran procesos electroquímicos.

El origen de una interfase para su definición posterior como electrodo o interfase electrificada, es un problema físico más que químico, pues en ello están involucrados mayormente procesos de naturaleza eléctrica. Sin embargo, luego la ocurrencia de estos últimos, los cambios químicos consecuentes, pueden pasar a ser dominantes en la formación de la interfase electrificada. La región de la fase en contacto directo con la interfase mantiene a su vez diferentes propiedades a las del seno de ella misma, en este caso, esa pequeña región tiene también diferentes características dependiendo de la fase original. Si la fase en cuestión es un conductor eléctrico (metal), el arreglo espacial de los iones positivos y de sus electrones de valencia queda definido por el grupo o el período al cual pertenece en la tabla periódica de los elementos. Se puede

considerar a la Tabla –por simplicidad– como un reticulado periódico tridimensional de iones positivos y un conjunto de electrones móviles, pertenecientes a ese conjunto, los cuales cambian de posición según la masa de estas especies (Zinola, 2007).

Por otro lado, es posible también explicar a la distribución de electrones por medio de la teoría de la nube electrónica fluctuante, donde las especies atómicas más cercanas a la interfase presentan una separación de cargas originando iones positivos con número de oxidación no entero y electrones por fuera de su corteza con el mismo valor absoluto de carga que la antepone. La distribución espacial de esos iones depende de la naturaleza del metal y de su rugosidad superficial (Figura 2.4). En la mayoría de los casos la región involucrada desde el conductor eléctrico no excede nunca las decenas o centenas del nm. Para la región de la interfase que queda comprendida del lado de la disolución electrolítica (conductor iónico) la situación es más compleja puesto que los iones y el disolvente adquieren estructuras asociadas diversas. Éstas mismas varían según el tipo de disolvente involucrado, la naturaleza del ion del medio electrolítico, el grado de solvatación iónico, la concentración de los mismos, la temperatura, etc. La reunión de la interfase electrificada junto con las porciones de las fases adyacentes establece lo que se llama una doble capa electroquímica (Zinola, 2007).

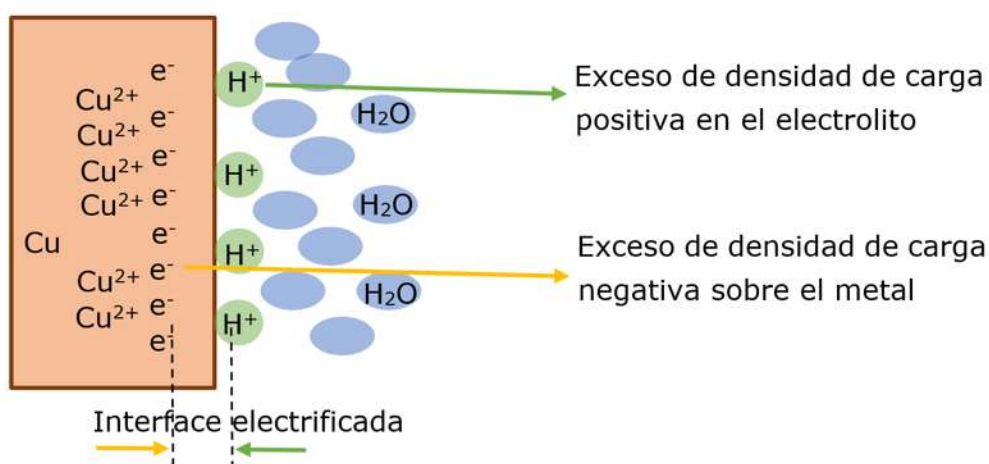


Figura 2.4. Representación de una interfase electrificada de cobre metálico, agua ionizada.

Una interfase formada por la reunión de cobre metálico y agua puede llegar a electrificarse luego de cierto tiempo pues es posible la separación de cargas de ambos lados. En realidad, la única estabilidad de la interfase formada tiene lugar

debido a esta consecuencia, el cobre metálico hace que los electrones de valencia de sus átomos se acerquen al límite de la fase dejando cargas catiónicas hacia el interior de la misma. De la misma manera, la fase agua se disocia en iones protón (o hidronios poliméricos, asociados a moléculas de agua) y oxhidrilo (hidratados o no, es decir rodeados de moléculas de agua). Las primeras especies se acercan a la fase cobre debido a la presencia de los electrones (Zinola, 2007).

Se define como electrodo a toda interfase electrificada que tenga asociada alguna reacción característica, que sea susceptible de ocurrir en ambas direcciones. Si se observa a la reacción, se ve que la equivalencia entre la especie Cu y la Cu^{2+} se da a través de 2 electrones por medio de la doble flecha $\rightleftharpoons$. En este caso, se darían simultáneamente dos reacciones con la misma probabilidad:

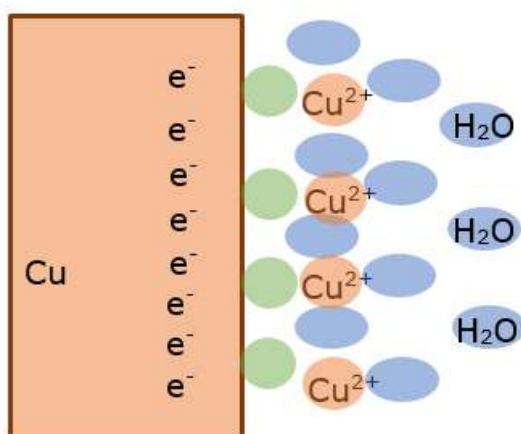
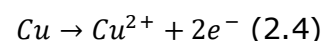
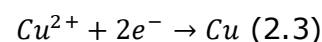


Figura 2.5. Representación de un electrodo de cobre metálico, iones cúpricos.

Transformadores de sustancia (sistemas electrolíticos)

Cuando dos electrodos o dos interfases se reúnen mediante un suministro externo de potencia continua (fuente de poder de alimentación continua), es posible que tanto un electrodo como el otro puedan transformarse en otras especies químicas por reacciones de electrorreducción o electro oxidación. Para uno u otro caso, la definición del tipo (anódica o catódica) y naturaleza (las

especies que reaccionan y los productos formados) de las reacciones quedarán establecidas por el potencial aplicado entre los conectores a los electrodos (Figura 2.6). Este sistema se conoce como transformador de sustancia o electrolizador y el proceso se conoce como electrólisis (Zinola, 2007).

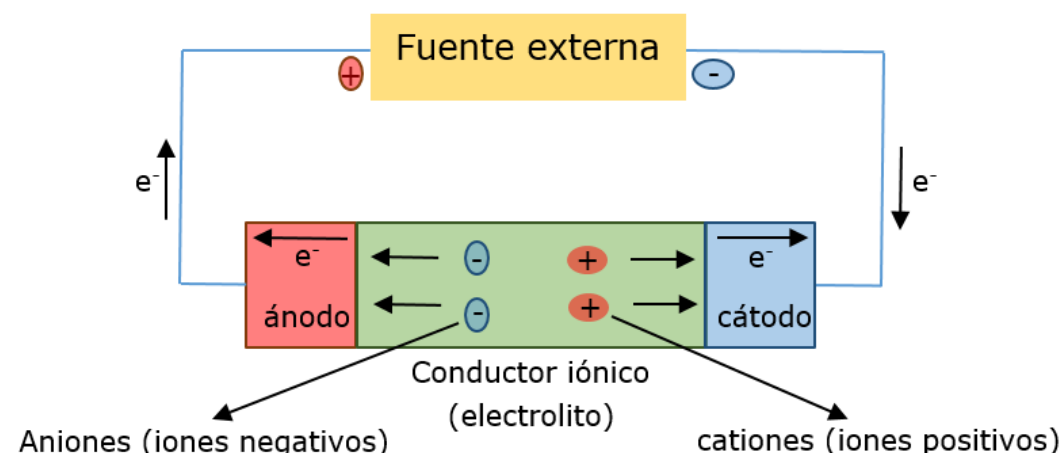


Figura 2.6. Representación de un sistema transformador de sustancia (electrolizador).

Celdas electrolíticas

Un esquema general de una celda electrolítica consta de un recipiente con el material de reacción y los electrodos, sumergidos en dicho material, y conectados a una fuente de corriente continua. Los electrodos son superficies sobre las que tienen lugar las semi-reacciones de oxidación y de reducción. Pueden o no participar en las reacciones. Aquellos que no reaccionan se llaman electrodos inertes. Hay electrodos sólidos como Zn, Cu, Pt, Ag, líquidos como el Hg, y gaseosos como el electrodo de H_2 . Independientemente del tipo de celda (electrolítica o galvánica) los electrodos se como cátodo, que es el electrodo en el que tiene lugar la reducción y ánodo, que es el electrodo en el que tiene lugar la oxidación.

En la Figura 2.7 se representa la reacción anódica donde se observa que la pérdida de electrones provocada por la fuente externa establece en el electrodo una reacción de electrooxidación sirviendo de salida de electrones (sumidero) (Zinola, 2007).

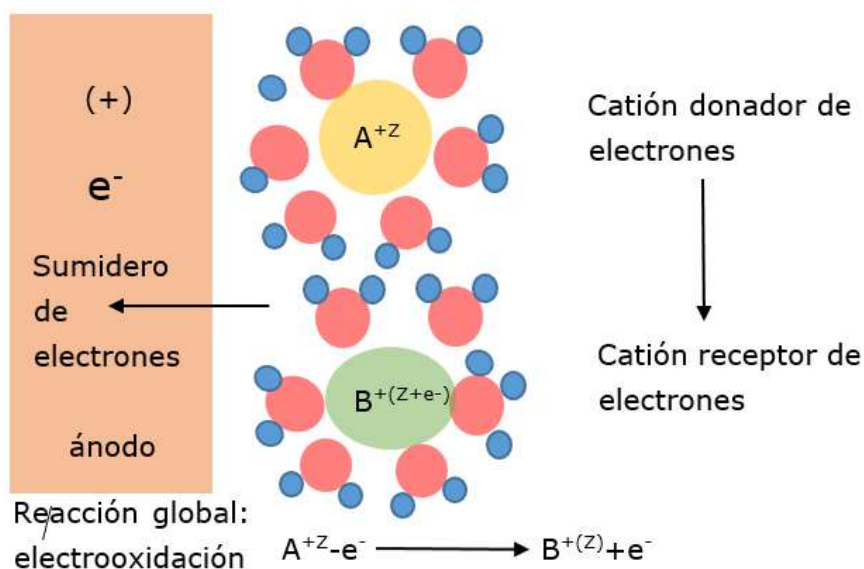


Figura 2.7. Representación de las reacciones de electrooxidación en el ánodo de un sistema productor de sustancia (electrolizador).

Por otro lado, en el caso del cátodo, la fuente de poder establece un flujo de electrones hacia el seno del metal provocando en la disolución electrolítica una reacción de electrorreducción (Figura 2.8). Esto hace que el conductor electrónico quede polarizado negativamente y las especies en el electrolito sufran una transformación química a partir de la reacción de electrorreducción inducida por la fuente (Zinola, 2007).

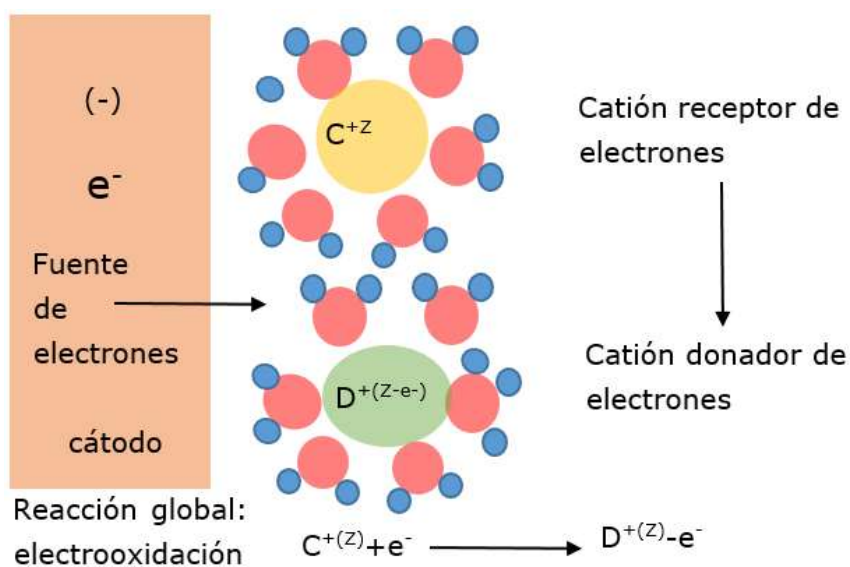


Figura 2.8. Representación de las reacciones de electrorreduccion en el cátodo de un sistema productor de sustancia (electrolizador).

La migración se conoce como el transporte de masa y carga en un electrolito debido a la acción de un campo eléctrico. En el caso de iones se conoce como migración iónica y en los coloides como migración electroforética. Las reacciones electroquímicas y químicas asociadas afectan a los procesos de transporte, ya que resultan en la formación y desaparición de los componentes de una reacción y en el aumento o consumo de energía eléctrica y química (Zinola, 2007).

La energía libre de adsorción de hidrógeno (ΔG_H) indica la fuerza del enlace metal-hidrógeno y también debe tenerse en cuenta. Si esta energía de enlace es demasiado negativa, el paso de Volmer (Ec 2.5) se favorece, pero el fuerte enlace M-H será difícil de romper, impidiendo así los demás pasos. Por el contrario, si el ΔG_H es positivo, provocará que el paso de Volmer sea menos probable, lo que ralentizaría la HER. Otro factor a considerar es la estabilidad del catalizador a diferentes valores de pH, por ejemplo, los metales no nobles son inestables en medios ácidos, pero pueden funcionar bien en medios básicos. Las combinaciones de metales no nobles con no metales pueden utilizarse para fabricar materiales con alta actividad catalítica en un amplio intervalo de pH. En resumen, el material electrocatalítico determina el mecanismo seguido por la HER; la elección del electrocatalizador implica una elección del pH del electrolito ya que la estabilidad del primero limita esta elección (Angeles-Olvera Z, 2022).

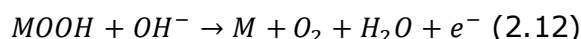
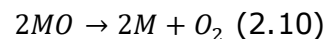
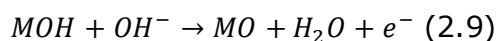
Paso de Volmer: $2H_2O + M + 2e^- \rightarrow 2MH_{ad} + 2OH^-$ (2.5)

Paso de tabla $2MH_{ad} \rightarrow H_2 + 2M$ (2.6)

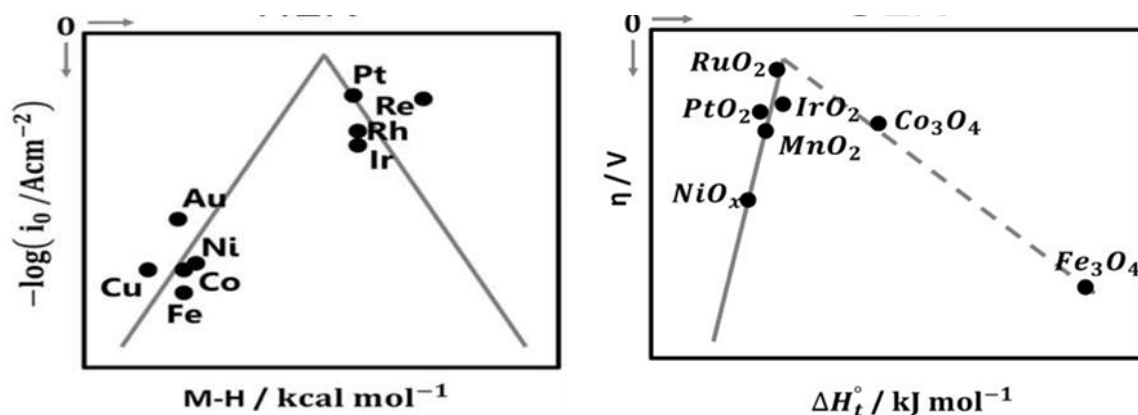
Paso de Heyrovsky: $2MH_{ad} + H_2O + e^- \rightarrow H_2 + M + OH^-$ (2.7)

La otra mitad de la reacción en la electrólisis del agua, la reacción de evolución del oxígeno (OER), implica la transferencia de cuatro electrones. El mecanismo seguido por la OER depende del electrocatalizador utilizado y del pH del electrolito. Los mecanismos que se han reportado para diferentes materiales catalíticos presentan variaciones en los intermediarios involucrados en la reacción global, principalmente en la reacción que precede a la formación del O_2 . Hay dos rutas principales para su formación: la primera es la combinación directa de dos átomos de oxígeno adsorbidos (MO), Ecuación (2.10), la segunda es la formación de un intermediario oxihidróxido (MOOH), Ecuaciones (2.11) y (2.12), que luego, tras un paso de oxidación, se descompondrá en O_2 . Si bien existen discrepancias en el mecanismo descrito para la OER, el cual varía según las condiciones electrocatalíticas, existen tres intermediarios principales

involucrados: el óxido (MO), el hidróxido (MOH) y el oxihidróxido (MOOH). Además, la eficiencia de la ORE depende de las interacciones entre el material electrocatalítico y los intermediarios. Debido a estas limitaciones termodinámicas y cinéticas, la ORE requiere la aplicación de altos valores de sobrepotencial (Angeles-Olvera Z, 2022).



Una herramienta útil para predecir la actividad de un nuevo electrocatalizador es el diagrama de volcán. Este diagrama se construye según el principio de Sabatier, que establece que un electrocatalizador óptimo debe exhibir energías de adsorción ni demasiado altas ni demasiado bajas, con respecto a un intermediario en una reacción electrocatalítica. El diagrama de volcán se obtiene graficando la velocidad de reacción frente a la energía libre de adsorción de un intermediario. Los diagramas de volcán para HER y OER se muestran en la Figura 2.9. Si bien los descriptores de la velocidad de reacción son diferentes, se puede observar que los mejores materiales para HER y OER son los metales nobles o sus óxidos (Angeles-Olvera Z, 2022).



(a) Gráfica de volcán para HER, densidad de corriente de intercambio representada en función de la energía de enlace metal-H. (b) Gráfica de volcán para OER, sobrepotencial para OER en función de la entalpía de la transición de óxido.

Figura 2.9. Diagramas de volcán según el principio de Sabatier.

Se ha demostrado que las estructuras porosas mejoran la actividad electrocatalítica de los electrocatalizadores en la electrólisis del agua. Una estructura porosa interconectada promueve la utilización completa del ECSA y genera un paso continuo para el transporte de portadores de carga, lo que mejora el proceso catalítico. Finalmente, la porosidad aumenta la estabilidad del electrocatalizador mediante la liberación eficiente de las burbujas de gas emergentes y la minimización del daño del electrodo (Angeles-Olvera Z, 2022).

Conducción eléctrica

La corriente eléctrica representa transferencia de carga eléctrica. Esta carga se puede conducir a través de metales y de soluciones iónicas llamadas electrolitos. Se considera que, en las celdas electroquímicas, ocurren los siguientes dos tipos de conducción eléctrica:

Tabla 2.1. Tabla de conductividad y resistividad de algunos materiales.

Elementos o materiales	Conductividad	resistividad
Plata	0.6305	0.0164
cobre	0.5958	0.0172
oro	0.4464	0.0230
aluminio	0.3767	0.0278
Latón	0.1789	0.0590
Cinc	0.1690	0.0610
Cobalto	0.1693	0.0602
Níquel	0.1462	0.0870
hierro	0.1030	0.0970
Acero	0.1000	0.1000
platino	0.0943	0.1050
Estaño	0.0839	0.1200
plomo	0.0484	0.2015
Magnesio	0.0054	2.700
Cuarzo	0.0016	4.500
Grafito	0.0012	8.000
madera seca	0.0010	10.000
carbón	0.00025	40.000

- **Conducción metálica:** Ocurre cuando al metal se le aplica una diferencia de potencial provocando el flujo de electrones, este fenómeno no produce cambios en el metal. La conductividad de los metales puede variar dependiendo de su estructura atómica única, la facilidad con que sus electrones de valencia (los electrones más externos) pueden moverse

libremente, la disposición de sus átomos en la red cristalina y la pureza del metal, lo que afecta la resistencia que ofrecen al flujo de electrones, en la tabla 2.1 se puede observar la conductividad y la resistividad de diferentes metales, la cual puede ser de gran utilidad en el momento de seleccionar los materiales a utilizar para los electrodos del electrolizador.

- **Conducción iónica o electrolítica:** Se produce mediante el movimiento de iones, a través de una solución electrolítica. Los iones positivos migran hacia el cátodo (electrodo negativo), mientras que los iones negativos se mueven hacia el ánodo (electrodo positivo).

Algunos otros conceptos importantes a definir son los siguientes:

- **Solución iónica:** Es aquella formada por iones que conducen la corriente eléctrica. Está formada por un soluto, el cual debe ser un electrolito, y un disolvente, generalmente el agua.
- **Electrolito:** Es una sustancia que tiene la propiedad de separarse en iones cuando está disuelta en un disolvente adecuado. Los electrolitos se clasifican en fuertes y débiles. Son electrolitos:
 - Soluciones acuosas de ácidos: HCl , H_2SO_4 , HNO_3 .
 - Soluciones acuosas de bases: NaOH , KOH .
 - Sales: CuSO_4 , NaCl .

En la Figura 2.10. se puede observar la conductividad de algunas soluciones electrolíticas sobresaliendo las soluciones ácidas lo cual deja ver que para aplicar electrólisis estas serían las más eficientes si del transporte de electrones se tratase, aunque la gran desventaja de los medios ácidos es su gran agresividad lo cual disminuye considerablemente la vida útil de los materiales utilizados durante la electrólisis, por lo que utilizar soluciones con pH básico parece ser mejor opción para poder alargar la vida útil de los materiales.

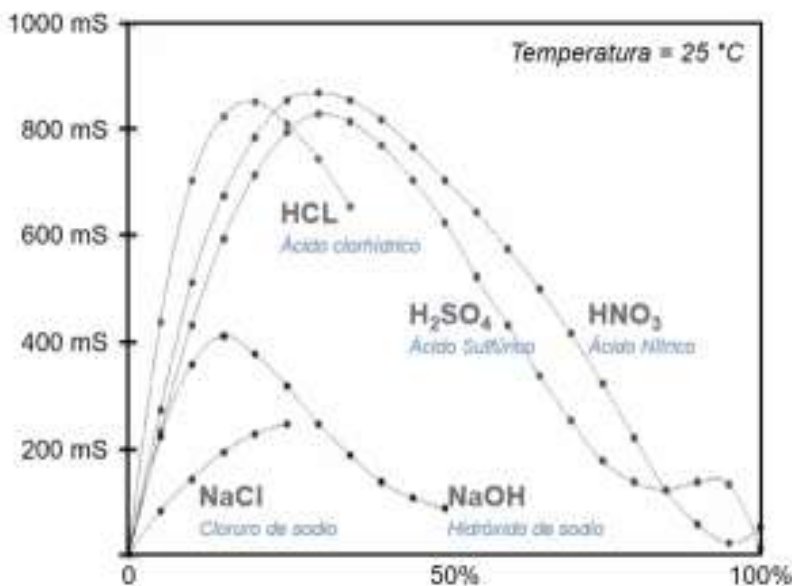


Figura 2.10. Conductividad eléctrica de diferentes soluciones según el laboratorio Bürkert Fluid Control Systems.

El electrolito más utilizado para la electrólisis de agua con pH básico son las soluciones acuosas de hidróxido de potasio (KOH), con 20%p a 30%p de KOH, ya que la conductividad específica es óptima en el intervalo de temperatura típico de 50° C a 80° C. Como alternativa más económica están las soluciones de hidróxido de sodio diluidas (NaOH), que exhiben menor conductividad. Las conductividades electrolíticas específicas calculadas para ambas soluciones electrolíticas a diferentes temperaturas se muestran en la Figura 2.11. Mientras que el KOH proporciona una conductividad específica de alrededor de $95 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ a 50° C, el NaOH alcanza alrededor de $65 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ a 25° C, se puede ver un efecto similar. La conductividad de soluciones de KOH es alrededor de 40% a 50% más alta que la conductividad de soluciones de NaOH, en el porcentaje óptimo de peso. Otro aspecto es la solubilidad de los gases del producto dentro del electrolito, ya que esto influye en la pureza del gas del producto resultante. En general, la solubilidad del gas cambia de forma inversamente proporcional a la concentración creciente de electrolito, debido al comportamiento de salinización. El NaOH también muestra efecto de salinización ligeramente mayor que el de KOH (Brauns, 2020).

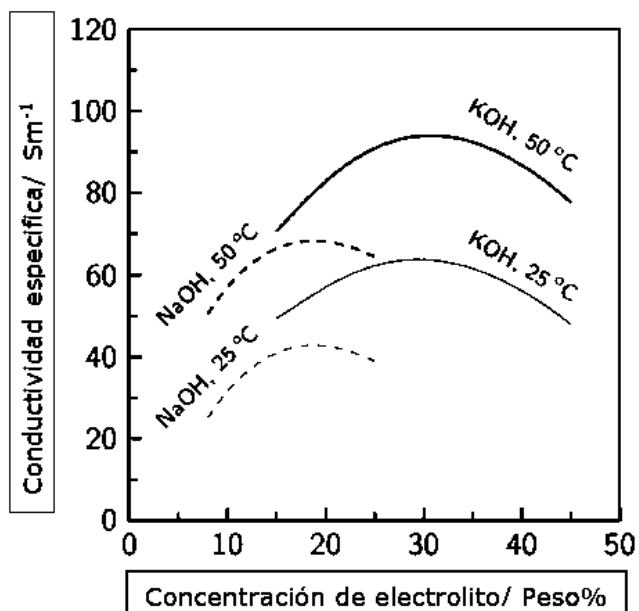


Figura 2.11. Conductividad electrolítica específica calculada en función de las concentraciones electrolíticas de soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH) a diferentes temperaturas.

La conductividad electrolítica de las soluciones depende, principalmente, de la fuerza del electrolito presente. En este sentido, los electrolitos se clasifican como:

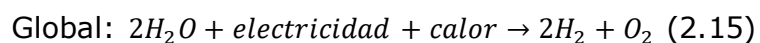
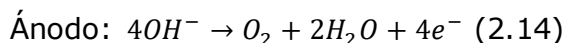
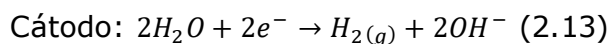
- **Electrolitos fuertes:** Son los que en solución se encuentran totalmente disociados en iones.
- **Electrolitos débiles:** Son aquellos que en solución se hallan parcialmente disociados en sus iones (el H_2O exhibe $K_w = 14$, por lo que es electrolito débil).

Para que los electrolitos se disocien, no es necesario el paso de corriente eléctrica. Cuando se suministra corriente eléctrica, los iones del electrolito se dirigen hacia los respectivos electrodos. En las pilas electrolíticas, la batería o fuente de corriente continua actúa como una bomba de electrones, empujándolos al interior del electrodo negativo (cátodo) y arrancándolos del electrodo positivo (ánodo).

Dentro de la celda para que se mantenga la electroneutralidad debe ocurrir un proceso que consuma electrones en el electrodo negativo y que los libere en el electrodo positivo. Este proceso se define como *reacción redox* (Vera, 2007).

En el electrodo negativo o cátodo, ocurre la reducción de un ion o molécula que aceptan electrones (reacción catódica). En el electrodo positivo, se generan electrones, debido a la oxidación de un ion o una molécula (reacción anódica). La reacción global de una celda, es la suma de las dos semi-reacciones en los electrodos. Mientras se produce esta reacción, hay un flujo de iones positivos o cationes hacia el cátodo y de iones negativos o aniones hacia el ánodo (Vera, 2007).

La electrólisis del agua es favorecida por los electrolitos, la ser agentes que cambian la conductividad eléctrica y el pH, ya sean ácidos o básicos. En el caso de agregar hidróxidos, se coloca la solución en una celda en presencia de dos electrodos conectados a la fuente de corriente eléctrica. Al aplicar el voltaje entre los electrodos, el agua se descompone para producir hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo, además de diferentes iones portadores de carga: H^+ , OH^- , O_2^- , y e^- . Las reacciones de electrólisis del agua en medio básico son endotérmicas (Jun Chi a, 2018), y en general se pueden resumir de la siguiente manera (Ecs. 2.13-2.15) (Angeles-Olvera Z, 2022).



La Figura 2.12 representa una modificación del electrolizador atmosférico tipo Hoffman el cual se utilizó para las pruebas de esta tesis en la cual se utilizó agua potable e hidróxido de sodio como solución electrolítica para generar un medio básico capaz de llevar a cabo las reacciones HER y OER.

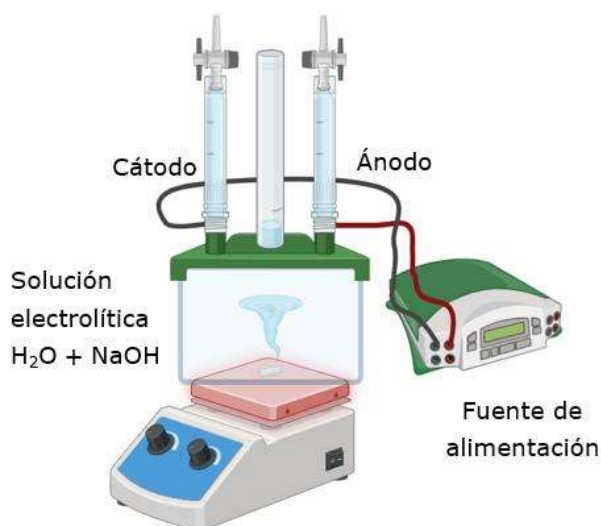


Figura 2.12. Sistema de electrolizador de agua con pH básico.

La electrólisis del agua puede clasificarse sobre la base de las diferentes temperaturas de funcionamiento. La electrólisis de agua con pH básico funciona a baja temperatura. (60°C – 80°C), con una solución acuosa de KOH y/o NaOH como electrolito, la concentración del electrolito es de aproximadamente entre 20%p y 30%p. En un electrolizador básico, el diafragma es un electrodo en el cual generalmente se utilizan materiales de asbesto y níquel. En un proceso de electrólisis la pureza del hidrógeno generado es aproximadamente del 99%. Sin embargo, se debe eliminar la niebla básica en el gas generado, para lo que normalmente se utilizan materiales que permitan con mayor facilidad su desorción.

La densidad de corriente de un electrolizador básico es inferior a 400 mA/cm^2 y el consumo de energía para la producción de H_2 es aproximadamente $4.5\text{--}5.5\text{ kWh/Nm}^3$ con eficiencia de aproximadamente el 60%. Para evitar que el hidrógeno/oxígeno se mezclen generando un riesgo de explosión, la presión entre los lados del ánodo y del cátodo se mantiene equilibrada. Además, los electrolizadores básicos no pueden ponerse en marcha rápidamente, lo que causa una respuesta de carga lenta. La larga preparación inicial dificulta la adaptación de los electrolizadores básicos a la naturaleza variable de las fuentes de energía renovables. Por lo tanto, los electrolizadores básicos se utilizan comúnmente con una entrada de energía constante (Jun Chi a, 2018).

Corrosión (sistemas autodestructores)

Este tipo de sistemas electroquímicos presenta una situación diferente a las anteriores puesto que las interfases en cuestión ya no son piezas de material inicialmente separadas en el espacio. En este caso, los dos conductores electrónicos son dos áreas de un mismo trozo de metal en contacto con el conductor iónico, en la que simultáneamente se dan una reacción de electrorreducción y una de electrooxidación. Sin embargo, no solamente resulta nuevo este tipo de sistemas por tener las dos reacciones transcurriendo sobre el mismo metal si no porque las mismas pueden cambiar de localización en el transcurso de ellas. Así, es que se podría representar al sistema de corrosión como (Zinola, 2007):

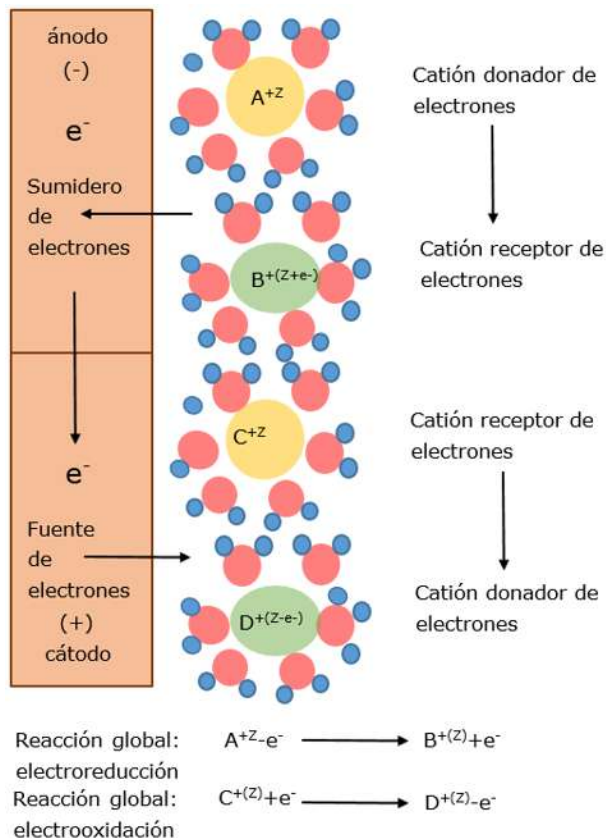
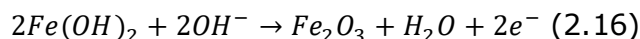
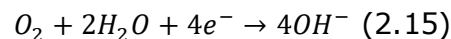
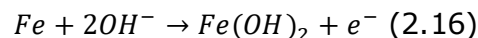


Figura 2.13. Representación de las reacciones de electrooxidación y electrorreducción en un sistema corrosivo (autodestructor).

La especie dadora de electrones ($A+Z$) establece un suministro continuo de los mismos al material que será corroído produciendo especies receptoras de electrones ($B+(Z+1)$), reacción de electrooxidación. Esos electrones comienzan

a circular por el material alcanzando otra posición en la que una especie nueva receptora de electrones (C+Z) podrá tomarlos y disminuir su número de oxidación a través de una reacción de electrorreducción para dar una nueva especie D+(Z-1). Para comprender fácilmente este sistema, considérese el siguiente (Zinola, 2007).

Si el hierro se encuentra en una atmósfera húmeda de pH neutro-básico, caso típico de la corrosión de herramientas y tractores en un ambiente agrícola (no marino) con aire húmedo, donde participan las especies químicas: Fe, Fe²⁺, O₂, OH⁻, Fe(OH)₂ y Fe metálico. Las reacciones electroquímicas globales que tienen lugar en este caso se pueden ver en las ecuaciones 2.16 y 2.17 (Zinola, 2007).



Electrolizadores a base de níquel

Aunque la electrólisis del agua tiene la ventaja de producir hidrógeno altamente puro (>99,9%), está limitada por su eficiencia energética seguridad, durabilidad, operatividad, portabilidad y los altos costos de instalación y operación. Es por eso que el desarrollo de materiales electrocatalíticos de bajo costo que acoplen eficientemente la transferencia de electrones en reacciones a bajos valores de sobrepotencial es de importancia. Las características de un electrocatalizador prometedor son un sobrepotencial más bajo a una densidad de corriente y una excelente estabilidad. Hasta ahora, los electrocatalizadores a base de metales nobles son los más eficientes (Angeles-Olvera Z, 2022).

Los metales nobles y sus óxidos se pueden utilizar para la electrólisis del agua, platino (Pt), óxidos de rutenio (RuO) y de iridio (IrO). Sin embargo, la implementación de metales nobles y sus aleaciones para la electrólisis del agua limita la escalabilidad industrial debido a sus altos costos y escasez. Una alternativa atractiva es la implementación de metales de transición, como Co, Ni, Fe o Mo, o sus aleaciones como electrocatalizadores para la electrólisis del agua.

Los electrocatalizadores basados en níquel son una alternativa económica y eficiente para la electrólisis del agua. Han demostrado buena estabilidad y actividad electrocatalítica. El níquel es un buen candidato para electrocatalizadores debido a su alta conductividad, estabilidad térmica y buenas propiedades eléctricas. Comúnmente, el Ni es un catión divalente, pero puede adquirir otras valencias en el intervalo de 1 a +4. Esta propiedad le permite experimentar diversas transiciones electrónicas.

La actividad del electrocatalizador hacia el HER está fuertemente influenciada por la fuerza del enlace Me-H. La relación entre la densidad de corriente del HER y la fuerza del enlace Me-H puede expresarse mediante un gráfico de volcanes. La figura 1 ilustra el caso de metales puros. La figura 2.14 demuestra claramente que, de todos los metales puros, los metales nobles presentan el mayor rendimiento de HER. Estos metales poseen una energía de enlace de hidrógeno cercana al óptimo, lo que permite la transición termodinámicamente más sencilla desde reactivos, pasando por intermedios, hasta productos (Angeles-Olvera Z, 2022).

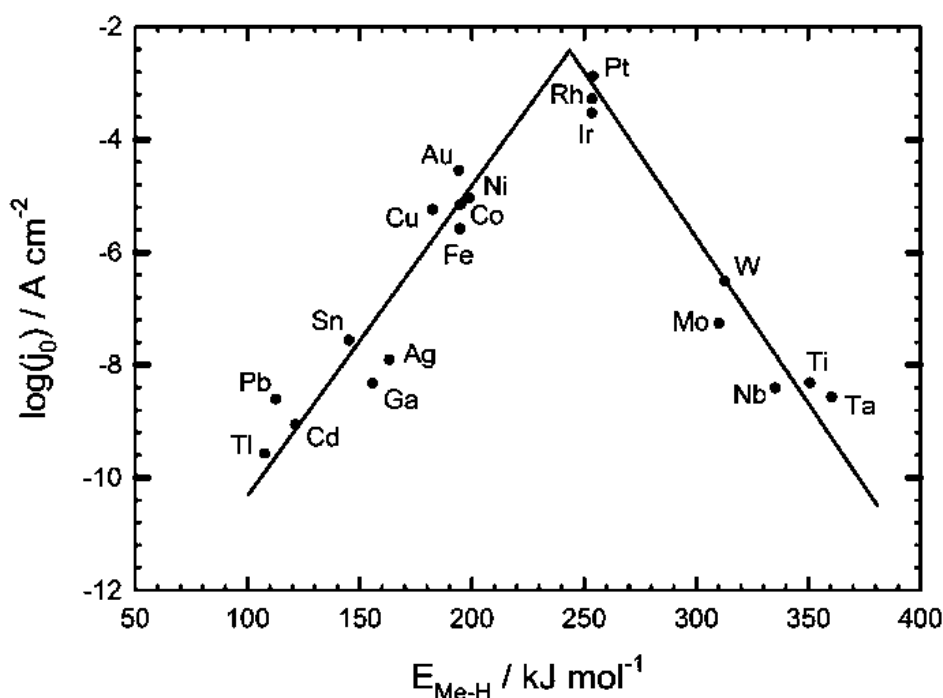


Figura 2.14. Dependencia del tipo volcánico entre la densidad de corriente de intercambio y la fuerza del enlace Me-H.

Los elementos del lado izquierdo presentan enlaces Me-H más débiles, lo que limita la adsorción de átomos de H en el sitio catalítico libre del electrodo. Por otro lado, un enlace Me-H fuerte impide la creación de un enlace H-H y la posterior desorción del H₂ producido. Sin embargo, se ha demostrado que la forma de volcán dada por el principio de Sabatier no siempre describe con precisión la dependencia real de la densidad de corriente HER con la fuerza del enlace Me-H. Esto es especialmente cierto para los materiales de la rama descendente (lado derecho) del diagrama de volcán, ya que, en las condiciones correspondientes a la reacción estudiada, suelen estar cubiertos por una capa oxidada. Por lo tanto, los átomos de hidrógeno no están en contacto principalmente con los átomos en estado metálico, sino con estos óxidos. Este hecho no se consideró cuando se presentaron los primeros diagramas de volcán HER.

La película de óxido puede reducir significativamente la velocidad de reacción y, por lo tanto, desplazar los materiales estudiados a la rama descendente. Una vez que se han omitido los metales formadores de óxido, es casi posible obtener una dependencia lineal (Martin, 2021).

Modelos de sistemas de separación de agua

A fin de que el proceso sea sostenible, o sea costeable y amigable con el ambiente además de promover beneficio social, se propone usar electricidad generada por otras energías amigables con el ambiente, como solar y/o eólica. El principio operativo de las AWE implica la conducción de aniones hidróxido, a través de un electrolito líquido entre dos electrodos. Los principales desafíos de la corriente Las desventajas son sus bajas densidades de corriente y la imposibilidad de operar con energías renovables intermitentes. fuentes de energía y cinética lenta. Estas limitaciones están asociadas con las primeras versiones de electrolizadores atmosféricos diseñados para operación continua en sitios industriales con Fuentes de electricidad estables y económicas (Yin, 2025). El hidrógeno verde representa una oportunidad transformadora para la descarbonización de diversos sectores, en particular el transporte y la industria pesada. Sin embargo, existen importantes desafíos, como la alta producción. Los costos, la infraestructura limitada y la falta de diferenciación deben ser dirigido a alcanzar su máximo potencial. Como se muestra en la Tabla 5,

Conseguir una reducción de los costos de producción por debajo de los 3 USD/kg es esencial que el hidrógeno verde compita con el hidrógeno fósil.

Tabla 2.2. Producción mundial de hidrógeno frente a demanda (2024-2030).

Año	Hidrógeno global producción (millones de toneladas)	Hidrógeno global demanda (millones de toneladas)
2024	90	120
2025	95	125
2026	100	130
2027	105	135
2028	110	140
2029	115	145
2030	120	150

El hidrógeno verde se reconoce cada vez más como una solución crucial para la descarbonización en diversos sectores, como el transporte, la industria pesada y el almacenamiento de energía. Sin embargo, su adopción generalizada se ve actualmente obstaculizada por diversos obstáculos, como los altos costes de producción, la infraestructura insuficiente y la insuficiente diferenciación del hidrógeno derivado de combustibles fósiles. Para promover la economía del hidrógeno verde, se requieren medidas políticas específicas. Estas incluyen la creación de una base de mercado orientada al clima, la garantía de resiliencia a largo plazo mediante cadenas de suministro diversificadas y la oferta de sólidos incentivos financieros. Abordar estos desafíos es esencial para liberar el potencial del hidrógeno verde y alcanzar los objetivos globales de neutralidad de carbono.

El papel del hidrógeno en la transición energética global se ha debatido ampliamente en la literatura reciente. Sin embargo, si bien se proyecta que el hidrógeno y sus derivados constituirán solo el 3.9% de la matriz energética mundial para 2050, muy por debajo del objetivo del 15% establecido por el Acuerdo de París, persisten importantes obstáculos para materializar este potencial. Entre los principales desafíos se incluyen los altos costos de producción, la falta de infraestructura y las dificultades para diferenciar el hidrógeno verde de las alternativas derivadas de combustibles fósiles. Por ejemplo, los costos actuales de producción del hidrógeno verde superan los USD5/kg, lo que lo hace menos competitivo en comparación con el hidrógeno

derivado de combustibles fósiles, cuyo costo ronda los USD12/kg, Sin embargo, gracias a los avances tecnológicos y las economías de escala, se prevé que los costos de producción de hidrógeno verde disminuyan a 3USD/kg para 2030, según un informe de IRENA. Además, el costo de reducción de carbono del hidrógeno verde oscila entre (500 y 1250) USD/t CO₂, mientras que el del hidrógeno fósil suele ser menor, lo que refleja una importante disparidad de costos (Yin, 2025).

El funcionamiento de los electrolizadores de agua con pH básico también se ve afectado por la periferia instalada, incluidas las fuentes de alimentación. La señal de salida puede contener un número específico de ondulaciones, lo que influye directamente en el rendimiento del proceso. Las fuentes de alimentación con una alta propensión a la ondulación reducen la eficiencia general y, por lo tanto, es necesario suavizar la señal. La formación de ondulaciones es evitable, pero los costos de los componentes serán más altos. En general, las fuentes de alimentación basadas en tiristores tienden a proporcionar un mayor grado de fluctuación, y los sistemas basados en transistores emiten una señal más suave. Además, una frecuencia de ondulación más alta no afecta tanto al rendimiento del sistema como la aparición de ondulaciones de baja frecuencia. Además, se puede observar una coherencia entre el comportamiento de la ondulación de una fuente de alimentación y la calidad del gas producto de la electrólisis del agua con pH básico (Brauns, 2020).

Para mejorar el proceso de electrólisis se necesita diseñar sistemas de energía de hidrógeno y estabilización de la red eléctrica, en la figura 2.15 se muestra un esquema de proceso ejemplar para un sistema de energía de hidrógeno.

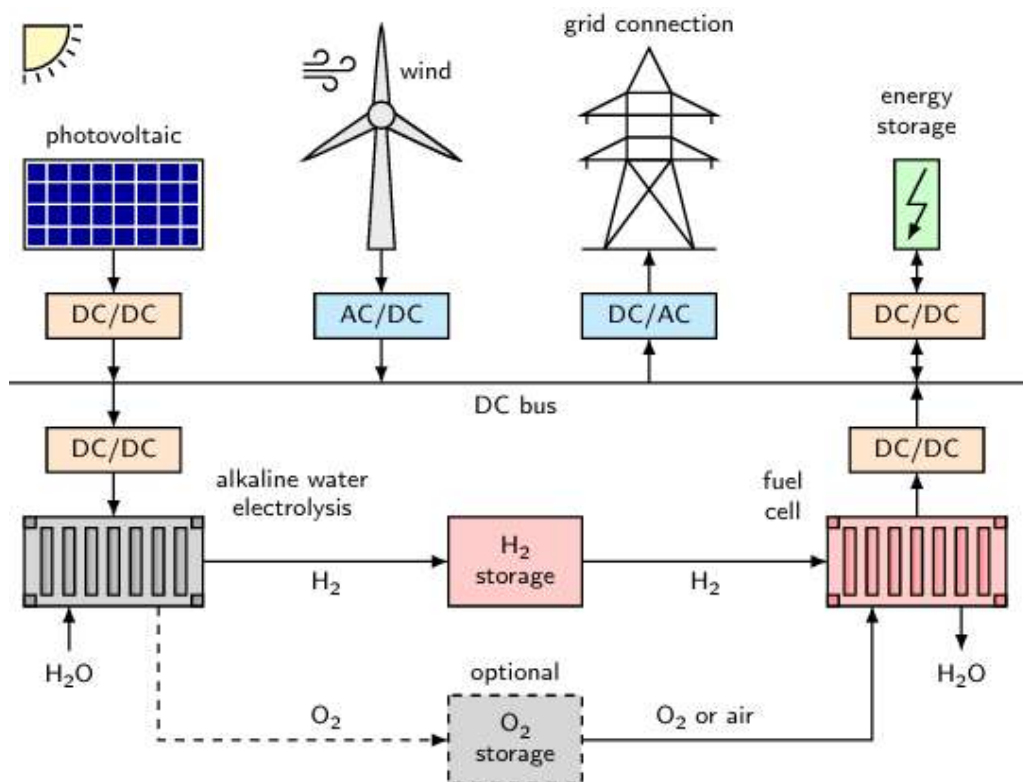


Figura 2.15. Esquema del proceso de un sistema de energía de hidrógeno.

Los paneles fotovoltaicos y las turbinas eólicas se conectan con convertidores adecuados a un bus de CC, desde el que se alimentan electrolizadores de agua con pH básico. El hidrógeno producido se puede almacenar para su posterior aplicación en pilas de combustible. Para aumentar la eficiencia de la pila de combustible, se puede utilizar el oxígeno producido en lugar del aire, por lo que es necesario disponer de un tanque de almacenamiento adicional, lo que genera costos adicionales. Las pilas de combustible también están conectadas al bus de CC, y la energía puede ser utilizada por la red eléctrica con convertidores de CC/CA. Con menores demandas de energía, se puede producir hidrógeno y convertirlo nuevamente en energía cuando sea necesario.

Como los electrolizadores de agua con pH básico convencionales están diseñados para funcionar en condiciones constantes, las fluctuaciones que se produzcan pueden amortiguarse mediante dispositivos de almacenamiento de energía adicionales, como baterías, supercondensadores o volantes de inercia. Cuando hay exceso de energía disponible, este almacenamiento de energía se puede cargar para que esté completamente disponible cuando sea necesario. La cantidad de amortiguación está limitada a un cierto grado de fluctuación, ya que

la cantidad de almacenamiento de energía también está restringida a la capacidad de todos los dispositivos instalados. Además, el hidrógeno producido también se puede utilizar para la descarbonización de procesos industriales o como combustible en el sector del transporte. Para aumentar la eficiencia general, algunos convertidores de CC/CC podrían descuidarse mediante diseños de sistemas optimizados al reducir la flexibilidad del sistema. Además, cuando los electrolizadores de agua con pH básico puedan funcionar en condiciones dinámicas, no se necesitarán dispositivos de almacenamiento de energía adicionales o, al menos, se podría reducir el número de dichos dispositivos. Aún quedan algunos desafíos que los fabricantes de electrolizadores deben superar antes de que esta posibilidad esté disponible (Brauns, 2020).

Los paneles fotovoltaicos y las turbinas eólicas generan energía renovable para alimentar electrolizadores de agua con pH básico, y el hidrógeno almacenado se puede convertir nuevamente en electricidad mediante celdas de combustible. Por lo tanto, se puede utilizar tanto oxígeno como aire. Los dispositivos de almacenamiento de energía adicionales pueden amortiguar las fluctuaciones, y el sistema de energía de hidrógeno completo se puede utilizar para estabilizar la red eléctrica (Brauns, 2020).

La Figura 2.16. ilustra el sistema bajo consideración con dos escenarios: con y sin almacenamiento de energía (ESS). Se puede observar que el sistema consta de cuatro componentes básicos: El primer componente es un conjunto fotovoltaico, seguido de un electrolizador (EL) y un almacenamiento de energía. y un tanque de almacenamiento de hidrógeno (HT). La unidad electrolizadora de agua extrae hidrógeno y oxígeno. del agua. El tanque de almacenamiento de hidrógeno completa el sistema desarrollado.

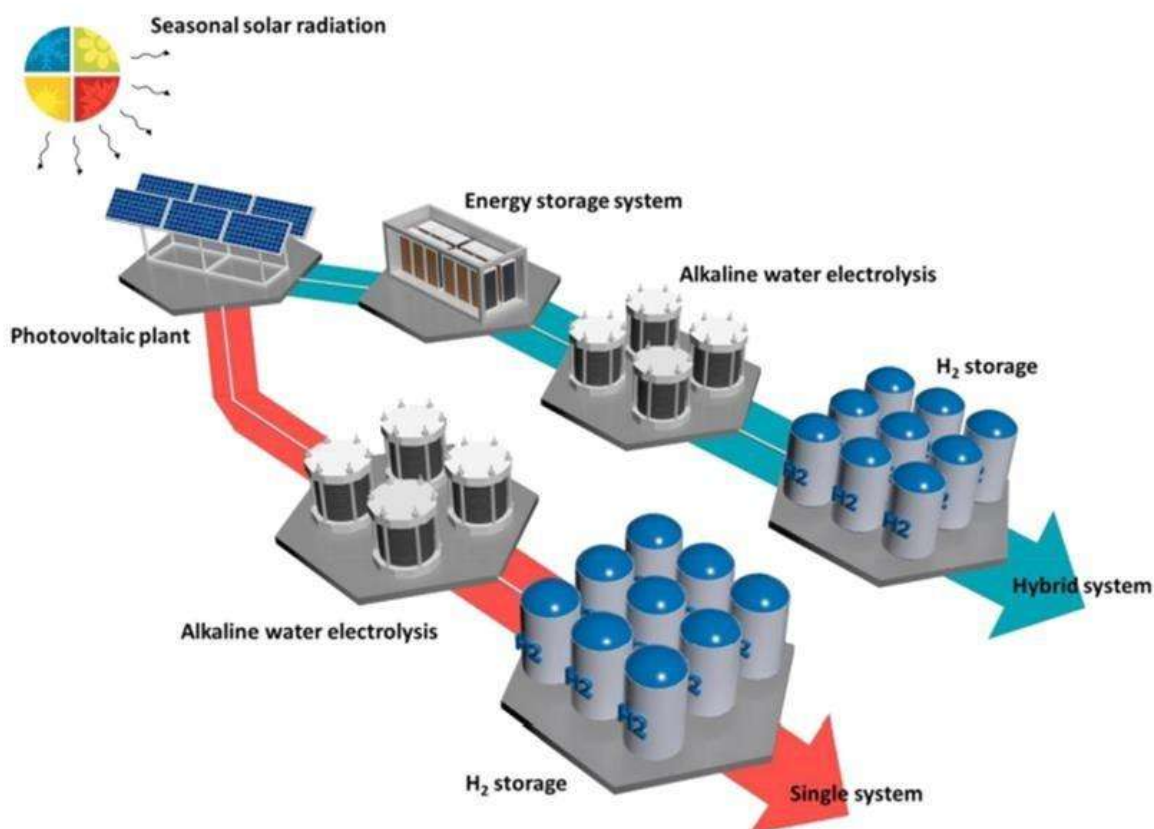


Figura 2.16. Escenarios para la electrólisis de agua con pH básico basado en energía fotovoltáica y energía fotovoltáica + almacenamiento.

Debido a la forma de generación, se ha clasificado el hidrógeno asignándole un color característico. En la figura 2.17 se puede observar la clasificación del hidrógeno según el consejo de eficiencia energética de norte américa, con su respectivo color característico y su medio de generación.

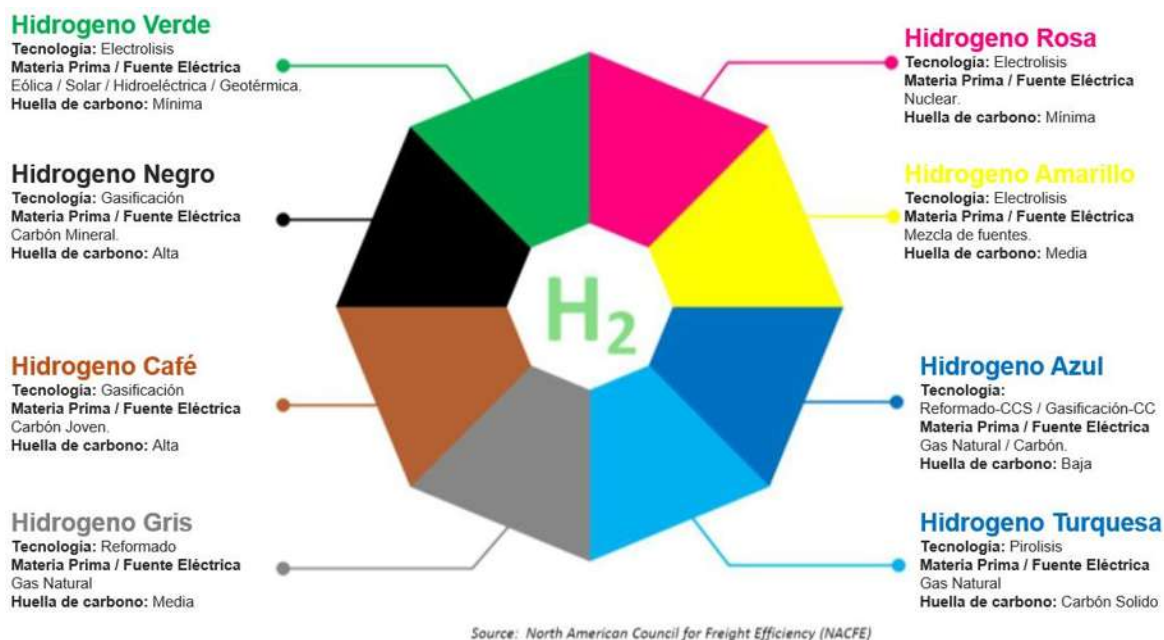


Figura 2.17. Clasificación del hidrógeno según su procedencia según el consejo de eficiencia energética de norte américa.

2.5. Usos del hidrógeno

El hidrógeno tiene múltiples aplicaciones y usos en diferentes sectores industriales y tecnológicos, como, la producción de amoníaco, refinación de petróleo, producción de coque/hierro, almacenamiento, combustible para vehículos eléctricos, celulares y vida residencial (Zi-You Yu, 2021).

- Industria química: Se utiliza como materia prima en la fabricación de amoníaco, metanol, y otros productos químicos importantes.
- Refinación de petróleo: Se usa para eliminar impurezas como el azufre y para convertir residuos pesados en productos más ligeros y de mayor valor.
- Producción de energía: Puede ser utilizado en celdas de combustible para generar electricidad de manera limpia y eficiente, especialmente en aplicaciones de vehículos eléctricos y almacenamiento energético.
- Sector transporte: Se está investigando como combustible alternativo para vehículos, ya sea a través de celdas de combustible o mediante la combustión directa en motores de combustión interna modificados.
- Industria siderúrgica: Se utiliza en la producción de acero para reducir el óxido de hierro y otros metales.

- Aeroespacial: Se emplea como combustible en cohetes y en sistemas de propulsión espacial.
- Almacenamiento de energía: Puede ser utilizado para almacenar energía de fuentes renovables, como solar y eólica, ya que estas fuentes no están disponibles de manera continua.
- Sector residencial y comercial: Se puede utilizar en sistemas de calefacción y cogeneración para generar calor y electricidad.
- Electrónica y fabricación de semiconductores: Es utilizado en procesos de depositación y limpieza de superficies.
- Sector agrícola: Se puede utilizar en la síntesis de fertilizantes y en aplicaciones de control de calidad de alimentos.

3. METODOLOGÍA

3.1. Experimentación

OBJETIVO:

Realizar una electrólisis en laboratorio para descomponer el agua en gas hidrógeno y oxígeno mediante el paso de corriente eléctrica en una sustancia iónica.

1. MATERIALES NECESARIOS:

- Fuente de corriente continua (DC)
- Cables con pinzas cocodrilo
- 2 electrodos (de acero inoxidable)
- Reactor experimental.
- Agua.
- Sustancia iónica (Hidróxido de sodio [NaOH] en agua).
- Guantes y gafas de seguridad.

2. PROCEDIMIENTO:

- Preparación del electrolito.
- Mezcla agua con unas escamas de Hidróxido de sodio (NaOH) para aumentar la conductividad.

3. MONTAJE DEL CIRCUITO

- Coloca los dos electrodos dentro de sus columnas de almacenamiento correspondientes.
- Llena el reactor al nivel de operación inicial con el electrolito preparado.
- Conecta los electrodos a la fuente de corriente continua:
- El electrodo conectado al polo positivo (+) será el ánodo.
- El electrodo conectado al polo negativo (–) será el cátodo.

4. INICIO DE LA ELECTRÓLISIS

- Enciende la fuente de corriente.
- Observa la formación de burbujas o cambios visibles en los electrodos:
 - En el cátodo (–): se suelen formar burbujas de hidrógeno (H_2).
 - En el ánodo (+): puede liberarse oxígeno (O_2).

5. OBSERVACIÓN Y RECOLECCIÓN DE PRODUCTOS

- Se mide la cantidad de gases recolectados y la cantidad de agua consumida.
- Se liberan o almacenan los gases dependiendo si se quieren analizar o no la pureza de estos.

6. APAGADO Y LIMPIEZA

- Apaga la fuente de corriente.
- Desconecta los cables y retira los electrodos con cuidado.
- Limpia los electrodos con agua destilada.
- Elimina o guarda el electrolito siguiendo las normas de seguridad.

7. SEGURIDAD

- Usa guantes, gafas y bata de laboratorio.
- No ingieras ni inhales productos.
- Nunca permitas contacto directo entre los electrodos.

En la figura 3.1. se puede observar los pasos que se llevaron a cabo durante la experimentación durante el proceso de electrólisis en el laboratorio, paso 1: preparar la solución electrolítica de agua potable con hidróxido de sodio, paso 2: colocar la solución electrolítica dentro del reactor sellado, paso 3: mantener en agitación constante la solución y comenzar a aplicar carga eléctrica a los electrodos, paso 4: la obtención de los gases donde se midieron en mililitros por medio del desplazamiento del agua en las columnas de almacenamiento. Finalmente se analizaba la cantidad de gas generado en cada columna contra el tiempo y la potencia aplicada durante el proceso de la electrólisis.

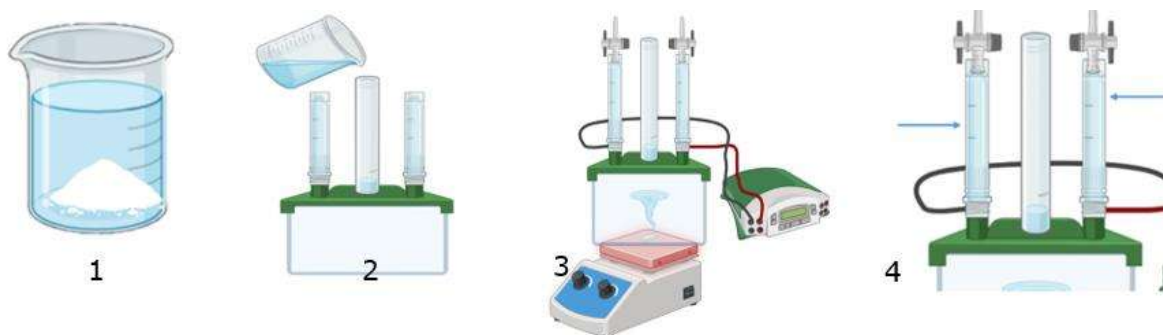


Figura 3.1. Pasos para la electrólisis en laboratorio.

3.2. Balances de masa

La Figura 3.2. puede esquematizarse como un electrolizador tipo Hoffman modificado continuo con tanque agitado, según se aprecia, se indica las tres corrientes que interactúan una corriente de entrada y dos de salida y la solución de hidróxido de sodio y agua.

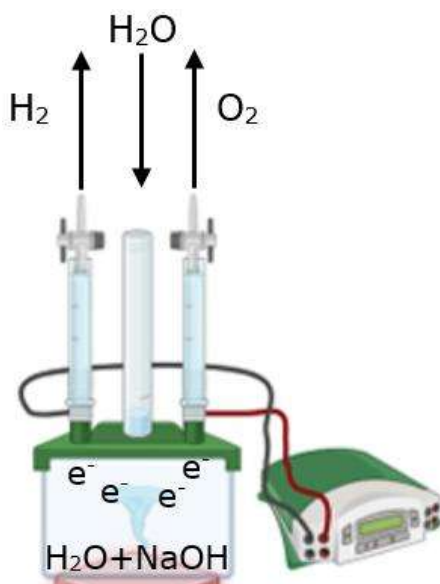
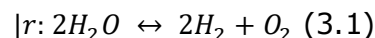


Figura 3.2. Esquema de electrolizador de laboratorio.

Suponiendo operación en estado estacionario, y considerando que la concentración de NaOH se mantendrá constante en el tanque mediante la reposición del agua que se convierta a hidrógeno y oxígeno, los balances de masa se esquematizan de la manera siguiente. Cabe notar que, al ser la concentración de sosa constante, su balance de masa es simplemente que no cambia en el tiempo, y por ello no se tomará en cuenta en el análisis del estado estacionario. Además, la reacción de separación del agua se puede considerar como una sola reacción (Ec. 3.1).



3.2.1. Análisis de grados de libertad

Número de corrientes (n_{corr})= 3: 1 entrada y 2 salidas.

Número de moléculas (n_c)= 3: $\{H_2O, H_2, O_2\}$.

Número de reacciones independientes (n_{lr})= 1: Ecuación 3.1.

Numero de variables de masa

$$n_v^m = n_{corr}(n_c + 1) + n_{lr} = 13$$

Número de ecuaciones*Balances de masa independientes*

$$n_c = 3$$

Restricciones

$$\sum_{i=1}^{n_c} \chi_{i,j} = 1, \dots, n_{corr}$$

$$n_{corr} = 3$$

$$\varepsilon_1$$

$$n_{lr} = 1$$

Total ecuaciones

$$n_E^m = 7$$

Número de grados de libertad

$$n_{Dm} = n_{vm} - n_{Em}$$

$$n_D^m = 6$$

3.2.2. Datos independientes

Los balances de masa serán resueltos con los siguientes datos; aquí, los flujos de agua, hidrógeno y oxígeno se medirán en el laboratorio, tal que la dinámica del sistema se considerará como una sucesión de estados estacionarios diferentes. Al disponer de más datos de los que requieren los grados de libertad, 2 de estos flujos se usarán para reconciliar datos.

Tabla 3.1. Datos independientes para el balance de masa.

	Corriente 1	Corriente 2	Corriente 3
Flujo (mm ³ /s)	F_1	F_2	F_3
Fracción mol H ₂ O	$\chi_{H_2O,1} = 1.0$	$\chi_{H_2O,2} = 0.0$	$\chi_{H_2O,3} = 0.0$
Fracción mol H ₂	$\chi_{H_2,1} = 0.0$	$\chi_{H_2,2} = 1.0$	$\chi_{H_2,3} = 0.0$

3.2.3. Ecuaciones de balances de masa

De manera simplificada, los balances de masa en estado estacionario (3.2-3.4) se realizan llenando la Tabla (3.2) de Moles del electrolizador (Figura 3.2).

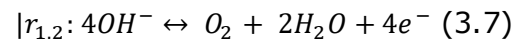
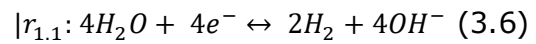
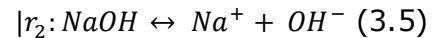
Tabla 3.2. Balances de masa en forma de tabla de moles.

Molécula	Entradas (E)	Salidas (S= E + G)	
H ₂ O	F_1	$0 = F_1 - 2\varepsilon_1$	(3.2)
H ₂	0	$2\varepsilon_1$	(3.3)
O ₂	0	ε_1	(3.4)

3.2.4. Términos de acumulación de los balances de masa

Como se explicó anteriormente, el sistema es dinámico, por lo que se deben de desarrollar los términos de acumulación de cada uno de los balances para poder seguir esta dinámica.

Dentro de las especies importantes a balancear se encuentran la cantidad de NaOH disociado en iones en la solución (Ec. 3.5) y los electrones transportados entre los electrodos, en consecuencia, de la separación de agua en dos pasos (Ecs. 3.6, 3.7).



Estas reacciones indican que por cada 2 moléculas de agua en la reacción se necesitan 2 electrones libres, para generar una molécula de hidrógeno. respectivamente, para generar 1 molécula de oxígeno se necesitan 4 moléculas hidroxilo, las cuales liberan 4 electrones y generan 2 moléculas de agua al mismo tiempo. Por lo tanto, para generar 2 moléculas de hidrógeno y 1 de oxígeno interactúan 4 electrones.

Los términos de acumulación de los balances de masa para cada una de estas especies, molares, iónicas y electrones se dan en las Ecuaciones (3.8-3.12). Y, finalmente, se requiere del balance de las moles de sosa en la solución (Ec. 3.14). Se incluyen las condiciones iniciales, al momento justo en que se comienza a suministrar corriente eléctrica.

$$\frac{dn_{H_2O}}{dt} = F_1\chi_{H_2O,1} - 4\varepsilon_{1.1} + 2\varepsilon_{1.2} = 0 \quad (3.8)$$

$$n_{H_2O}(t=0) = n_{H_2O,i} \quad (3.8.1)$$

$$\frac{dn_{H_2}}{dt} = 2\varepsilon_{1.1} - F_2\chi_{H_2,2} = 0 \quad (3.9)$$

$$n_{H_2}(t=0) = n_{H_2,i} \quad (3.9.1)$$

$$\frac{dn_{O_2}}{dt} = \varepsilon_{1.2} - F_3\chi_{O_2,3} = 0 \quad (3.10)$$

$$n_{O_2}(t=0) = n_{O_2,i} \quad (3.10.1)$$

$$\frac{dn_{OH^-}}{dt} = -4\varepsilon_{1.1} + 4\varepsilon_{1.2} = 0 \quad (3.11)$$

$$n_{OH^-}(t=0) = n_{OH^-,i} \quad (3.11.1)$$

$$\frac{dn_{e^-}}{dt} = -4\varepsilon_{1.1} + 4\varepsilon_{1.2} = 0 \quad (3.12)$$

$$n_{e^-}(t = 0) = n_{e^-i} \quad (3.12.1)$$

$$\frac{dn_{NaOH}}{dt} = -\varepsilon_2 = 0 \quad (3.13)$$

$$n_{NaOH}(t = 0) = n_{NaOHi} \quad (3.13.1)$$

$$\frac{dn_{Na^+}}{dt} = \varepsilon_2 = 0 \quad (3.14)$$

$$n_{Na^+}(t = 0) = n_{Na^+i} \quad (3.14.1)$$

Enseguida, los avances de las reacciones |r1.1 (Ec. 3.15) y |r1.2 (Ec. 3.16) se calculan en términos del avance de la reacción |r1 (Ec. 3.1); así, el número de moles de las especies que no se pueden medir (Ecs. 3.11-3.14), se calculan sustituyendo estos avances.

$$\varepsilon_{1.1} = F_2 \chi_{H_2,2} \Rightarrow \varepsilon_{1.1} = 2\varepsilon_1 \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_{1.2} = F_3 \chi_{O,3} \Rightarrow \varepsilon_{1.2} = \varepsilon_1 \quad (3.15)$$

Las Ecuaciones (3.2-3.4, 3.13-3.16) se programaron en Excel, para poder dar seguimiento al movimiento de electrones y iones en la solución acuosa.

3.3. Diseño de experimentos

Se utilizó un diseño factorial fraccionado, 2^3 , con réplicas en el punto central, completamente aleatorios. Los 3 factores considerados son: {voltaje, temperatura, concentración hidróxido de sodio}. Las respuestas son: {consumo de agua, productividad de gas, gasto energético}.

Tabla 3.3. Esquema codificado del diseño factorial 2^3 .

Orden Est	Orden Corrida	Voltaje	NaOH	Temperatura
11	1	0	0	0
4	2	1	1	-1
10	3	0	0	0
2	4	1	-1	-1
5	5	-1	-1	1
7	6	-1	1	1
8	7	1	1	1
3	8	-1	1	-1
1	9	-1	-1	-1
9	10	0	0	0
6	11	1	-1	1

Una vez realizadas las pruebas exploratorias se determinaron los niveles para cada factor seleccionado debido a la capacidad del reactor, teniendo en cuenta que el voltaje se midió en voltios (V), la concentración de hidróxido de sodio (NaOH) se midió en concentración molar (M) y la temperatura se midió en grados centígrados ($^{\circ}$ C) los cuales son los siguientes.

Tabla 3.4. Valores mínimos y máximos de cada factor.

Factor/Nivel	-1	1
Voltaje	30	50
NaOH	0.00125	0.015
Temperatura	22	50

3.4. Desarrollo de las etapas del proyecto

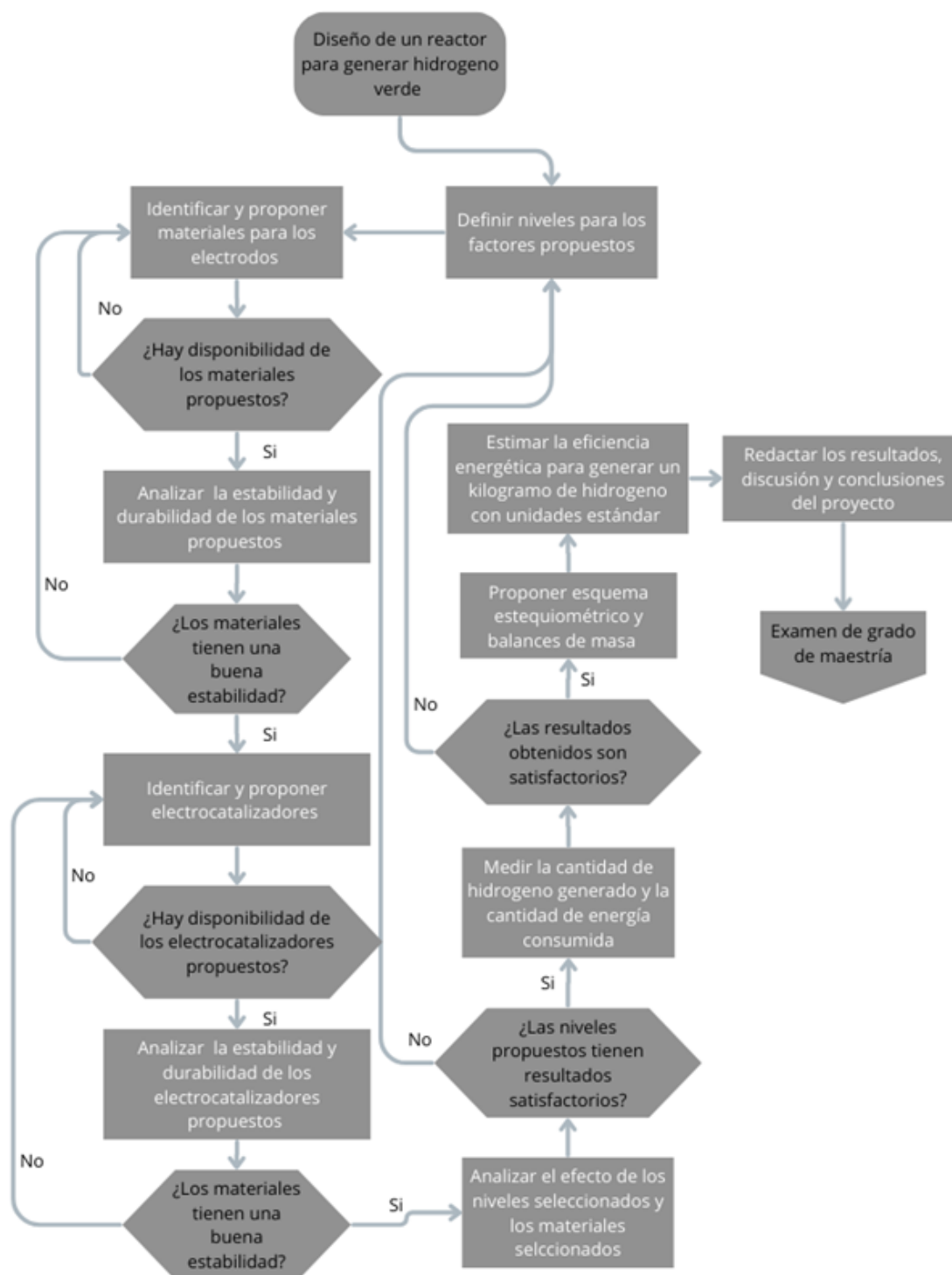


Figura 3.3. Diagrama de Flujo Lógico de la Metodología de la Investigación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Pruebas exploratorias

Durante las pruebas se utilizó un electrolizador tipo Hoffman (modificado) para llevar a cabo la reacción de generación de hidrógeno. Durante el periodo de experimentación se diseñaron dos reactores:

Electrolizador (modelo 1) con capacidad de 2.25 litros de solución y 2 columnas para almacenamiento de gas con capacidad de 80 ml cada una, el cual se localizó sobre un agitador magnético y se conectó a una fuente de poder de corriente continua.



Figura 4.1. Electrolizador Tipo Hoffman modificado (modelo 1)

Debido a la baja capacidad de almacenamiento de gas se diseñó el electrolizador (modelo 2) con capacidad de 3.05 litros de agua y 2 columnas para almacenamiento de gas con capacidad de 326 ml cada una, permitiendo analizar y observar durante más tiempo la estabilidad de los electrodos y la generación de gas.

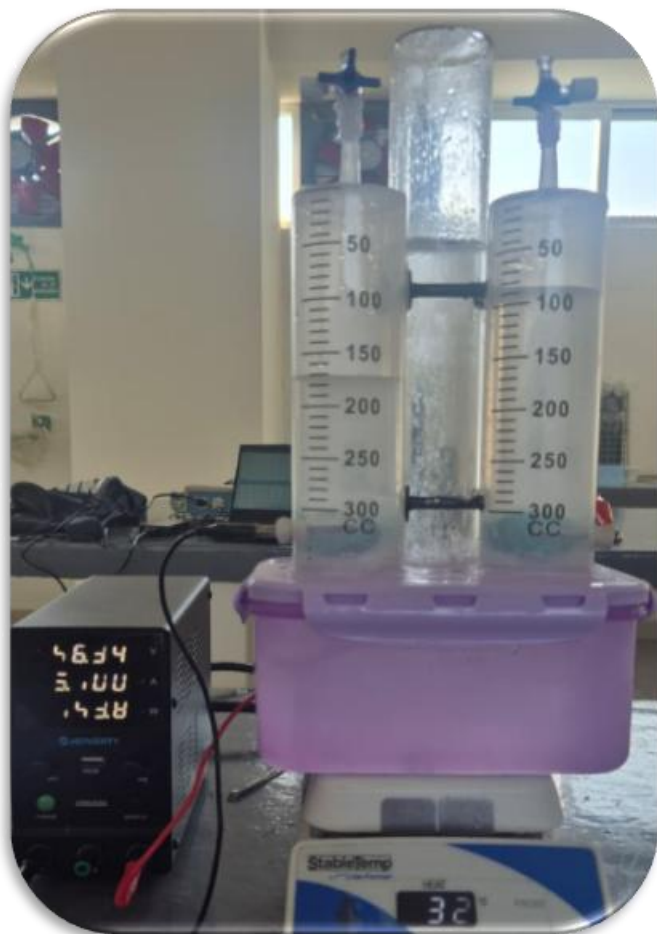


Figura 4.2. Electrolizador tipo Hoffman modificado (modelo 2).

Una vez seleccionados los materiales propuestos se realizaron varias pruebas exploratorias con el fin de conocer el efecto que tendrían estos al exponerlos a un proceso de electrólisis para así poder analizar su comportamiento y su durabilidad durante las pruebas y así poder descartar las propuestas menos efectivas, se propusieron catalizadores de níquel (Ni-SBA15, CAT-Ni y Níquel metálico), y materiales para los electrodos (cátodo y ánodo).

Tabla 4.1. Propuestas de materiales a utilizar durante la electrólisis.

Propuestas		Reacciones
Material	Aplicaciones	
Ni-SBA15	Suspendido en solución	Ralentización de la ruptura de las moléculas, generación de micro corrientes.
Níquel (catalizador)	Suspendido en solución	Poco resistente al aumento de temperatura, generación de micro corrientes.
Níquel	Suspendido en solución	Generación de micro corrientes eléctricas, formación de hidróxidos y óxidos metálicos, inestabilidad conductiva.
	Ánodo	Formación de hidróxidos y óxidos metálicos
	Cátodo	Buena conductividad, baja formación de hidróxido y óxidos metálicos.
Acero inoxidable	Ánodo	Buena conductividad, baja formación de hidróxido y óxidos metálicos.
	Cátodo	Buena conductividad, baja formación de hidróxido y óxidos metálicos.
Cobre	Ánodo	Formación de hidróxidos y óxidos metálicos
	Cátodo	Buena conductividad, baja formación de hidróxido y óxidos metálicos.
Acero quirúrgico	Ánodo	Baja conductividad, baja formación de hidróxido y óxidos metálicos.
	Cátodo	Baja conductividad, baja formación de hidróxido y óxidos metálicos.

Según lo observado en las pruebas se descartaron los catalizadores (Ni-SBA15, CATNi y Ni metálico) ya que estos ralentizaban la generación del hidrógeno, y estos podrían estar actuando como un electrodo flotante (figura 2.13) los cuales generan inestabilidad en la reacción de generación del hidrógeno y en la transferencia de electrones a su vez generando micro corrientes eléctricas y una mezcla de los gases en las columnas de recolección, se descartó el acero quirúrgico debido a que este generaba una resistencia al flujo de electrones lo

cual ralentizaba la ruptura de las moléculas de agua, a su vez se descartaron el cobre y el níquel como material en los electrodos positivos o ánodos debido a que estos generan una gran cantidad de óxidos metálicos lo cual también ralentiza la generación del hidrógeno.

Por lo que se propuso utilizar únicamente acero inoxidable (SS316) en electrodo positivo para todas las pruebas, y únicamente variando el material del electrodo negativo con los materiales seleccionados (ss316, Ni, Co).

Una vez seleccionados los materiales a utilizar en los electrodos se seleccionaron los niveles para cada factor definiéndolos de la siguiente manera:

- Concentración de hidróxido de sodio: condicionado por el pH obtenido en muestras provenientes del lavado del biodiesel, con pH de 9-13, y molaridad de 0.00125-0.015.
- Temperatura propuesta: Desde temperatura ambiente hasta 50° C.
- Voltaje: Estandarizado de 30 a 50 volts debido a la alta conductividad en la solución con concentraciones de hidróxido altas.

Al probar en los intervalos descritos fue que los niveles mínimos y máximos para el diseño experimental se definieron en la tabla 3.4.

Debido a que se propuso utilizar el acero inoxidable en el electrodo positivo para todas las combinaciones variando de material solo en el electrodo negativo (SS316, Cobre, Níquel) se propusieron 3 combinaciones para Cátodo-ánodo: Co-SS316, Ni-SS316 y SS316-SS316, utilizando el mismo diseño experimental factorial 2^3 con el fin de poder comparar la producción de gases para cada nivel de los factores propuestos, con cada una de las combinaciones de materiales seleccionados en un tiempo promedio de 15 minutos.

Tabla 4.2. Resultados de la producción de hidrógeno (Co-SS316).

Orden Estadístico	Orden Corrida	Voltaje (V)	NaOH (M)	Temperatura (° C)	Producción H ₂ (ml/15min)
11	1	40	0.09	36	176
4	2	50	0.15	22	420
10	3	40	0.09	36	184
2	4	50	0.00125	22	6
5	5	30	0.00125	50	6
7	6	30	0.15	50	316
8	7	50	0.15	50	565
3	8	30	0.15	22	214
1	9	30	0.00125	22	4
9	10	40	0.09	36	180
6	11	50	0.00125	50	10

Tabla 4.3. Resultados de la producción de hidrógeno (Ni-SS316).

Orden Estadístico	Orden Corrida	Voltaje (V)	NaOH (M)	Temperatura (° C)	Producción H ₂ (ml/15min)
11	1	40	0.09	36	184
4	2	50	0.15	22	450
10	3	40	0.09	36	200
2	4	50	0.00125	22	7
5	5	30	0.00125	50	4.5
7	6	30	0.15	50	306
8	7	50	0.15	50	565
3	8	30	0.15	22	206
1	9	30	0.00125	22	3
9	10	40	0.09	36	190
6	11	50	0.00125	50	10

Tabla 4.4. Resultados de la producción de hidrógeno (SS316-SS316).

Orden Estadístico	Orden Corrida	Voltaje (V)	NaOH (M)	Temperatura (° C)	Producción H ₂ (ml/15min)
11	1	40	0.09	36	126
4	2	50	0.15	22	326
10	3	40	0.09	36	136
2	4	50	0.00125	22	2.5
5	5	30	0.00125	50	1.75
7	6	30	0.15	50	250
8	7	50	0.15	50	532
3	8	30	0.15	22	146
1	9	30	0.00125	22	2
9	10	40	0.09	36	138
6	11	50	0.00125	50	5

En las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 se puede observar la producción de hidrógeno para cada una de las combinaciones de los factores dadas por el diseño experimental, donde se puede ver una tendencia bastante similar en la producción en cada nivel comparándolo así mismo con en la figura 4.3 donde se puede observar la comparación de las diferentes combinaciones de los materiales de forma más visual, dados estos resultados se puede concluir que según la intensidad de corriente utilizada en estas pruebas la reacción de evolución del hidrógeno no ha sufrido una variación muy considerable.

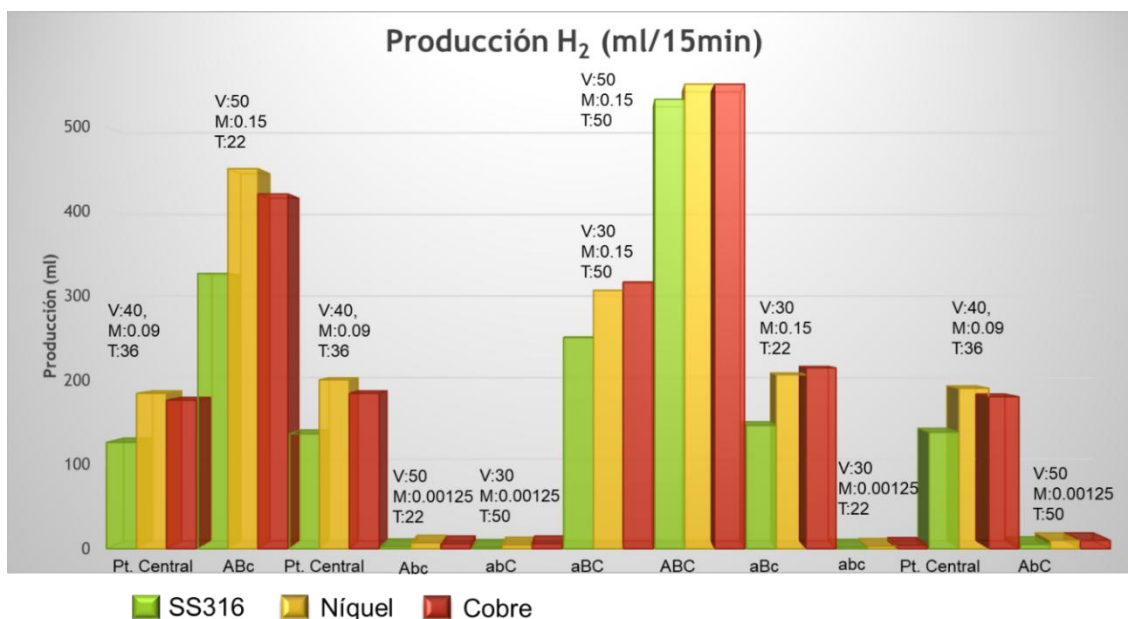


Figura 4.3. Comparación de la producción de hidrógeno en 15 minutos (SS316, Ni y Co).

Debido a que la producción de hidrógeno fue bastante similar para las tres combinaciones de electrodos, se propuso usar la combinación SS316-SS316 ya que este parece ser una mejor opción debido al costo de los materiales.

Una vez seleccionado el acero inoxidable (SS316) como material para los electrodos en el proceso de la electrólisis se decidió cambiar la forma de los electrodos a un cilindro con una nervadura helicoidal continua (cilindro roscado) y comparar su producción de hidrógeno entre electrodos cilíndricos y electrodos cilíndricos Roscados, con el fin de observar si existe un cambio al modificar la forma de la superficie de contacto del electrodo con la solución.

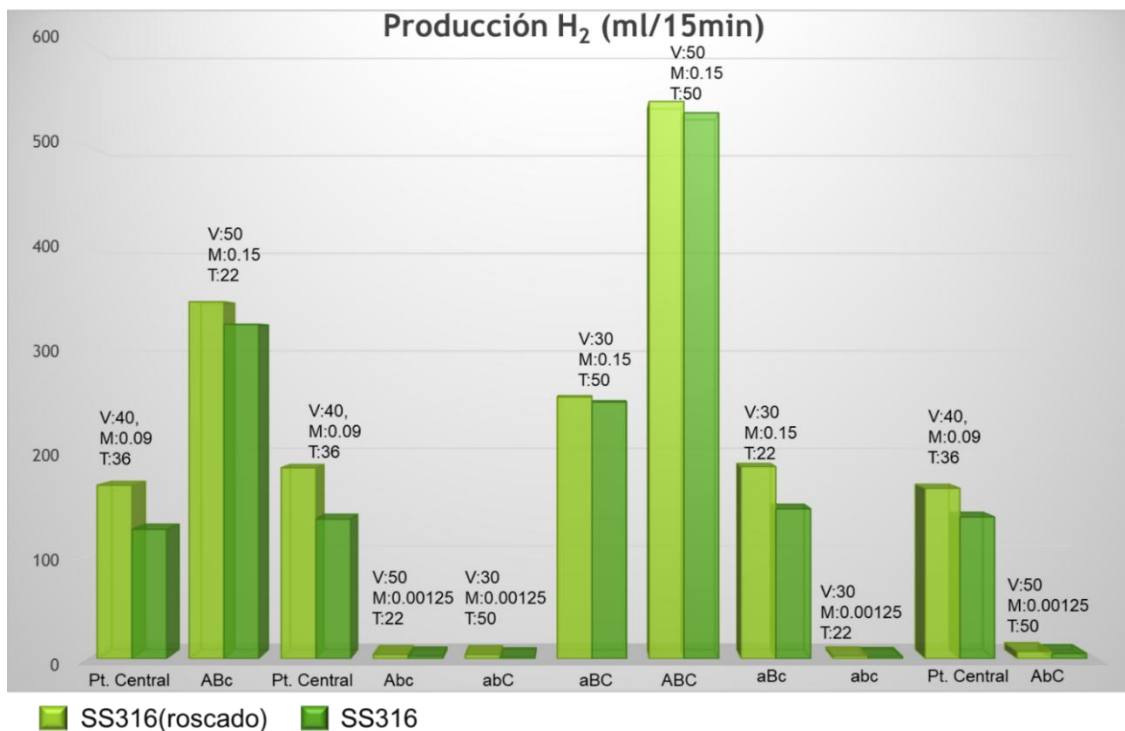


Figura 4.4. Comparación de la producción de hidrógeno en 15 minutos (SS316-roscado y SS316).

En la figura 4.4 se puede observar que hay un aumento en la producción de hidrógeno que indica que la forma del electrodo si influye en la tasa de producción por lo que se propone usar los electrodos roscados para continuar con la experimentación.

Una vez seleccionados los electrodos se comparó el uso de agua potable contra el uso de agua potable para analizar cómo afecta la solubilidad del hidróxido de sodio (NaOH) en diferentes medios y así mismo la influencia de este en la producción de hidrógeno.

En la siguiente tabla se puede observar que a bajas concentraciones del hidróxido de sodio el pH se mas influenciado en agua destilada que en agua potable, pero conforme la concentración de este va aumentando el pH va siendo bastante similar, en esta prueba se comparó el pH de las soluciones antes y después de aplicar electrólisis a la solución durante 15 minutos.

Tabla 4.5. Influencia del hidróxido de sodio en agua potable y agua destilada antes y después del proceso de electrólisis.

Orden Corrida	Voltaje (V)	NaOH (M)	Temperatura (° C)	Agua potable		Agua destilada	
				pH _o	pH _f	pH _o	pH _f
1	40	0.09	36	12.57	12.77	12.31	12.74
2	50	0.15	22	13.27	13.30	13.28	13.54
3	40	0.09	36	12.59	12.78	12.35	12.75
4	50	0.00125	22	9.50	9.30	11.59	11.61
5	50	0.15	50	12.58	13.25	12.34	13.05
6	30	0.15	22	13.26	13.29	13.50	13.60
7	30	0.00125	22	9.23	9.30	11.65	11.70
8	40	0.09	36	12.38	12.74	12.28	12.70

Se propuso el uso del agua destilada para el proceso de electrólisis para analizar si la hay influencia en la producción de hidrógeno debido a que el hidróxido tiene mayor solubilidad en agua destilada, pero en la Figura 4.5. se puede ver que el usar agua destilada disminuyo la producción de hidrógeno ya que por sí sola el agua potable es más conductiva que el agua destilada debido a los iones presentes en el agua potable, aunque estos no interactúan en la reacción si facilitan el transporte de los electrones.

La menor producción de hidrógeno al utilizar agua destilada en lugar de agua potable se debe principalmente a su baja conductividad iónica, lo que incrementa la resistencia interna del sistema y reduce la corriente efectiva, afectando directamente la eficiencia de la electrólisis en agua de pH básico.

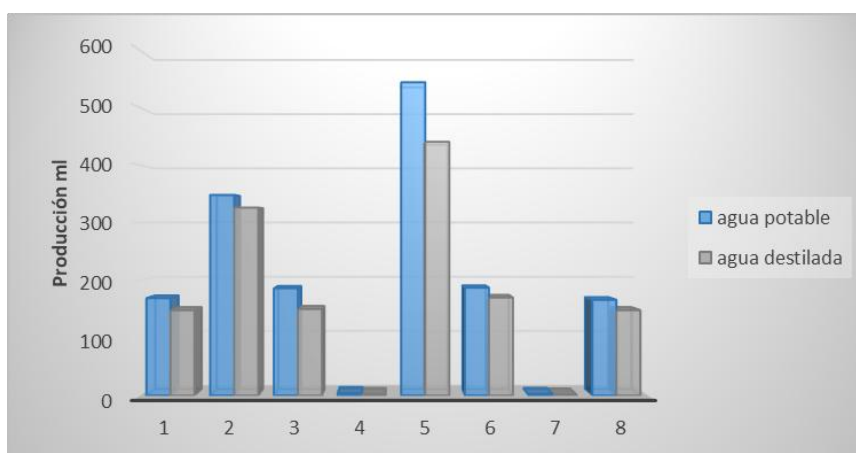


Figura 4.5. Comparación de la producción de hidrógeno en 15 min con agua potable y agua destilada (SS316-roscado).

4.2. Experimentación usando los factores ajustados

Una vez seleccionados los electrodos se midió la producción de hidrógeno durante 15 min, siguiendo el orden de aleatoriedad del diseño experimental, comparándolo con agua potable sin electrolito a 22° C (prueba 0), en la tabla 4.6. se puede observar dicha producción.

Tabla 4.6. Producción de hidrógeno.

Orden Corrida	Voltaje (V)	NaOH (M)	Temperatura (° C)	Producción H ₂ (mL/15min)
1	40	0.09	36	169
2	50	0.15	22	348
3	40	0.09	36	186
4	50	0.00125	22	4
5	30	0.00125	50	4
6	30	0.15	50	255
7	50	0.15	50	543
8	30	0.15	22	187
9	30	0.00125	22	3
10	40	0.09	36	166
11	50	0.00125	50	7
0	50	0.0	22	2

Los resultados fueron sometidos al análisis de varianza para determinar cómo afectan cada uno de los factores propuestos en sus respectivos niveles y así mismo la interacción entre estos.

Tabla 4.7. Coeficientes codificados.

Término	EE del					
	Efecto	Coef	coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	11.254	0.254	44.27	0.001		
Voltaje	7.558	3.779	0.254	14.87	0.004	1.00
NaOH	21.925	10.963	0.254	43.12	0.001	1.00
Temperatura	4.458	2.229	0.254	8.77	0.013	1.00

Voltaje*NaOH	7.408	3.704	0.254	14.57	0.005	1.00
Voltaje*Temperatura	2.142	1.071	0.254	4.21	0.052	1.00
NaOH*Temperatura	4.308	2.154	0.254	8.47	0.014	1.00
Voltaje*NaOH*Temperatura	2.092	1.046	0.254	4.11	0.054	1.00
Pt Ctrial		0.324	0.487	0.66	0.575	1.00

En las tablas 4.7 y 4.9 se puede analizar de manera estadística los factores con mayor influencia durante el proceso de electrólisis, tomando en cuenta el Valor p, el cual nos ayuda a identificar los de mayor influencia según su valor, si este valor es menor a 0.05 nos indica que hay una influencia mayor de este factor, si el valor p es mayor a 0.05 este factor no tiene un efecto significativo. En la tabla 4.8 se puede observar el valor S el cual nos indica que tan preciso es nuestro modelo en este caso nuestro valor S es un poco elevado lo cual podría deberse a una inestabilidad en el proceso de electrólisis el cual se podría deber al tipo de medición, formación de burbujas, perdidas entre otros, en la mayoría de los casos tenemos un valor p pequeño lo cual nos indica que tenemos efectos de los factores significativos, aunque un proceso inestable.

Tabla 4.8. Resumen del modelo.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.719053	99.92%	99.60%	*

Tabla 4.9. Análisis de Varianza.

Fuente	GL	SC	Ajust. MC	Ajust. Valor F	Valor p
Modelo	8	1280.46	160.058	309.57	0.003
Lineal	3	1115.42	371.807	719.11	0.001
Voltaje	1	114.26	114.257	220.98	0.004
NaOH	1	961.41	961.411	1859.46	0.001
Temperatura	1	39.75	39.753	76.89	0.013
Interacciones de 2 términos	3	156.06	52.021	100.61	0.010
Voltaje*NaOH	1	109.77	109.767	212.30	0.005
Voltaje*Temperatura	1	9.17	9.173	17.74	0.052
NaOH*Temperatura	1	37.12	37.123	71.80	0.014
Interacciones de 3 términos	1	8.75	8.750	16.92	0.054
Voltaje*NaOH*Temperatura	1	8.75	8.750	16.92	0.054
Curvatura	1	0.23	0.228	0.44	0.575

Error	2	1.03	0.517
Total	10	1281.50	

Según el análisis ANOVA se propuso una ecuación de regresión de unidades no codificadas (Tabla 4.10) la cual ayudaría a predecir, interpretar físicamente y usar en la práctica los resultados de un modelo estadístico, usando las unidades reales del proceso, no valores normalizados o codificados.

Tabla 4.10. Ecuación de regresión de unidades no codificadas.

$$\begin{aligned} \text{Tasa de producción} = & 11.254 + 3.779 \text{ Voltaje} + 10.963 \text{ NaOH} + 2.229 \text{ Temperatura} \\ & + 3.704 \text{ Voltaje*NaOH} + 1.071 \text{ Voltaje*Temperatura} + 2.154 \\ & \text{NaOH*Temperatura} + 1.046 \text{ Voltaje*NaOH*Temperatura} + \\ & 0.324 \text{ Pt Ctral} \end{aligned}$$

Tabla 4.11. Ajustes y diagnóstico para observaciones poco comunes.

	Tasa de	Resid			
Obs	producción	Ajuste	Resid	est.	
2	23.200	23.200	-0.000	*	X
4	0.267	0.267	0.000	*	X
5	0.267	0.267	0.000	*	X
6	17.000	17.000	0.000	*	X
7	36.200	36.200	-0.000	*	X
8	12.467	12.467	0.000	*	X
9	0.167	0.167	-0.000	*	X
11	0.467	0.467	-0.000	*	X

X poco común X

En el siguiente Diagrama Pareto se puede observar de manera comparativa los factores y sus combinaciones que tuvieron mayor influencia al momento de realizar la experimentación para separar el gas hidrógeno del agua, se puede diferenciar de manera que los factores que se encuentran del lado derecho de la línea roja punteada son los de mayor influencia y los del lado izquierdo son los de menor influencia y así ayudando a descartar dichos factores.

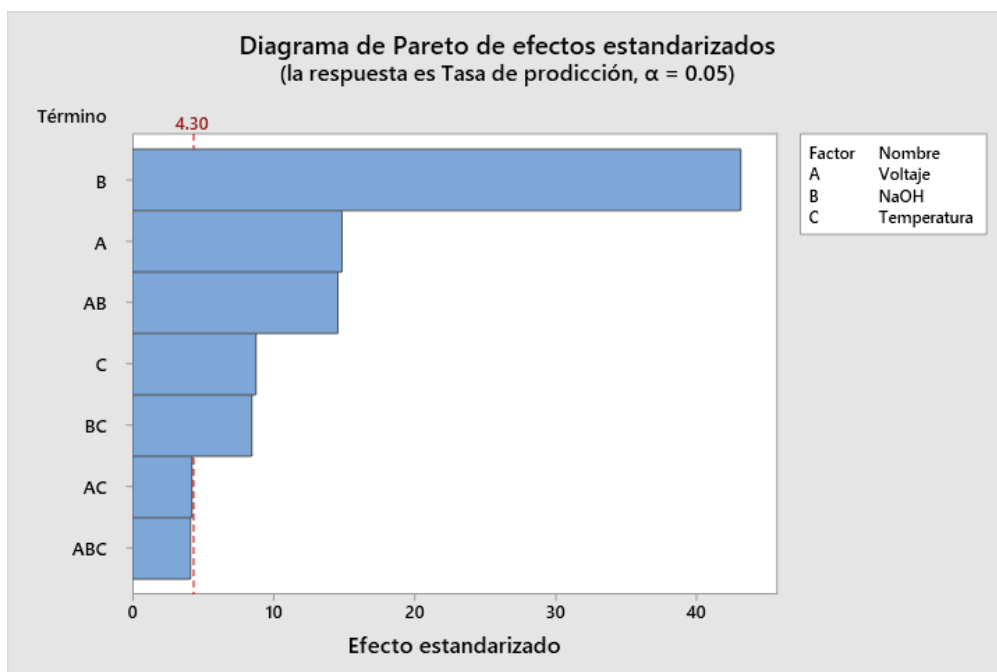


Figura 4.6. Diagrama Pareto de efectos estandarizados.

El siguiente conjunto de graficas se utiliza para evaluar si un conjunto de datos sigue una distribución normal. Si los datos son aproximadamente normales, los puntos en la gráfica se agruparán cerca de una línea recta. Las desviaciones de esta línea recta sugieren desviaciones de la normalidad, según el tipo de gráfica, el orden de los datos se encuentra dispersos alrededor de las líneas marcadas significa buena aleatoriedad en los datos.

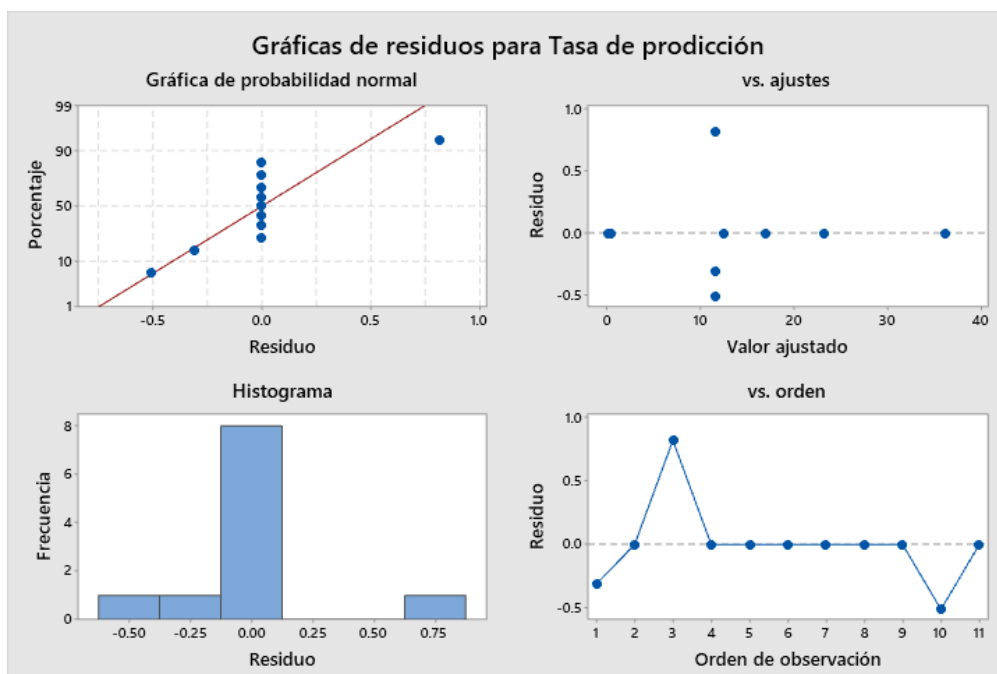


Figura 4.7. Gráficas de residuos.

En la Figura 4.8. se puede observar la influencia de cada uno de los factores considerados por separado teniendo en cuenta la línea ascendente para los que tienen un efecto mayor en este caso el punto más alto representa el factor que tardo más tiempo en producir un mililitro de hidrógeno.

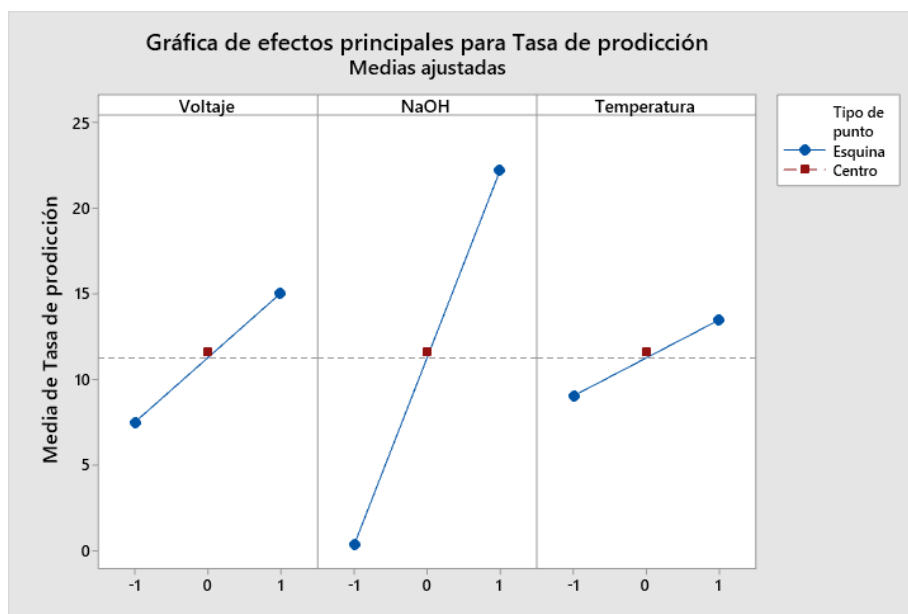


Figura 4.8. Gráfica de efectos principales.

En la siguiente graficas se puede observar según la colorimetría cómo interactúan entre si los diferentes factores teniendo un color azul donde la interacción de los factores hizo la reacción más lenta y el color verde donde la interacción de los factores genero una mayor producción de hidrógeno la cual sería nuestra zona de interés, para así lograr encontrar la combinación de nuestros factores que ayuden a acelerar la producción de hidrógeno.

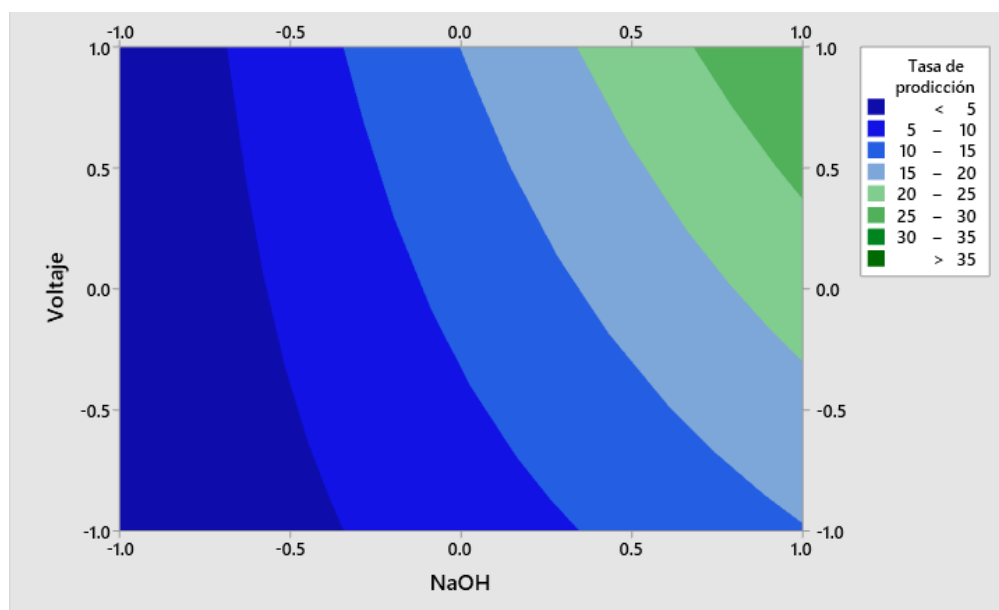


Figura 4.9. Grafica de contorno (Voltaje vs NaOH).

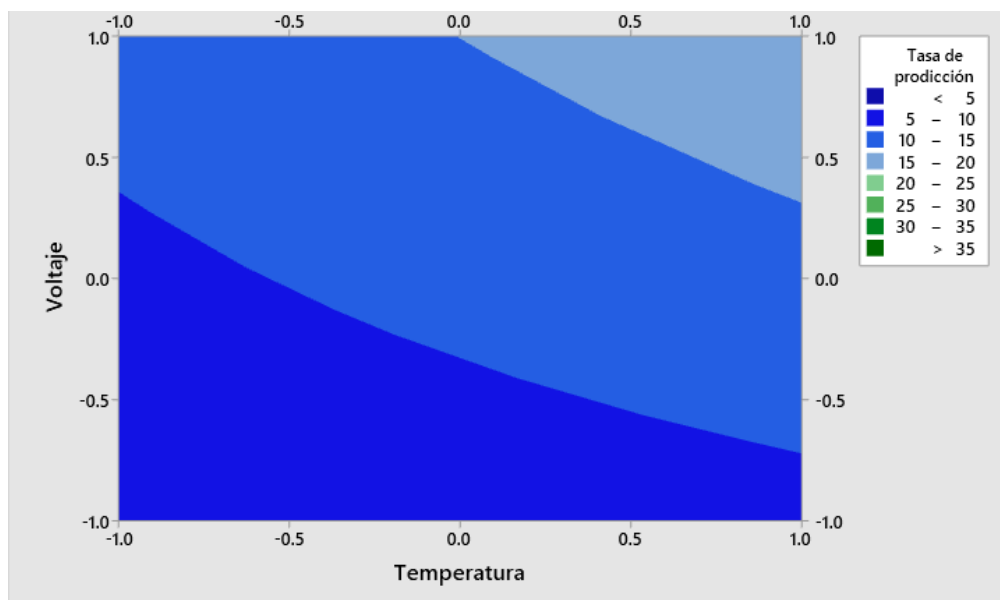


Figura 4.10. Grafica de contornos (Voltaje vs Temperatura).

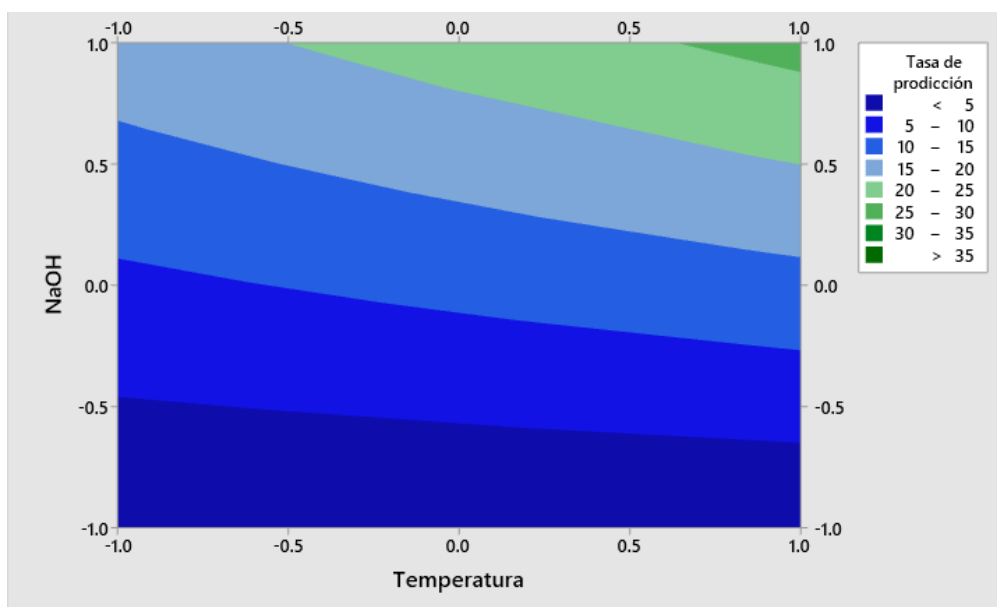


Figura 4.11. Gráfica de contornos (NaOH vs Temperatura).

En la siguiente tabla se puede observar los cambios del pH de cada una de las pruebas comparándolas con agua potable sin hidróxido de sodio (prueba 0), se puede analizar los diferentes comportamientos del pH antes durante y al finalizar la electrólisis, en las pruebas de temperatura ambiente se puede ver una disminución del pH durante la electrólisis, pero al finalizar la prueba ya estabilizada la muestra se observa un aumento en el pH debido al aumento de la concentración del hidróxido de sodio en la solución, por otro lado se tienen las muestras en las que se utilizó agua caliente donde se puede observar un aumento del pH en cada medición esto debido a que la temperatura fue disminuyendo durante la prueba, en los puntos centrales se logra apreciar un aumento aunque menor debido a que el cambio de temperatura es menor.

Figura 4.12. Comportamiento del pH durante la experimentación.

Orden Corrida	Voltaje (V)	NaOH (M)	Temperatura (° C)	pH inicial	pH 5min	pH 10min	pH 15min	pH Final
1	40	0.09	36	12.57	12.63	12.66	12.68	12.77
2	50	0.15	22	13.27	13.26	13.25	13.22	13.30
3	40	0.09	36	12.59	12.70	12.68	12.73	12.78
4	50	0.00125	22	9.50	9.34	9.29	9.27	9.30
5	30	0.00125	50	8.94	8.98	9.01	9.03	9.20

6	30	0.15	50	12.56	12.72	12.70	12.73	13.20
7	50	0.15	50	12.58	12.72	12.70	12.70	13.25
8	30	0.15	22	13.26	13.09	13.08	13.05	13.29
9	30	0.00125	22	9.23	9.19	9.09	9.05	9.30
10	40	0.09	36	12.38	12.48	12.60	12.64	12.74
11	50	0.00125	50	9.00	9.02	9.01	8.95	9.20
0	50	0	22	8.23	8.20	8.12	7.96	8.18

En la Figura 4.13 se puede observar el comportamiento del pH de la solución de cada una de las pruebas realizadas con el material seleccionado, también se puede ver el pH alcanzado para cada una de las molaridades seleccionadas siendo la molaridad más alta (0.15M) un pH superior a 13, para la molaridad más baja (0.00125M) un pH superior a 9, así mismo para los puntos centrales con molaridad media (0.09M) un pH superior a 12.

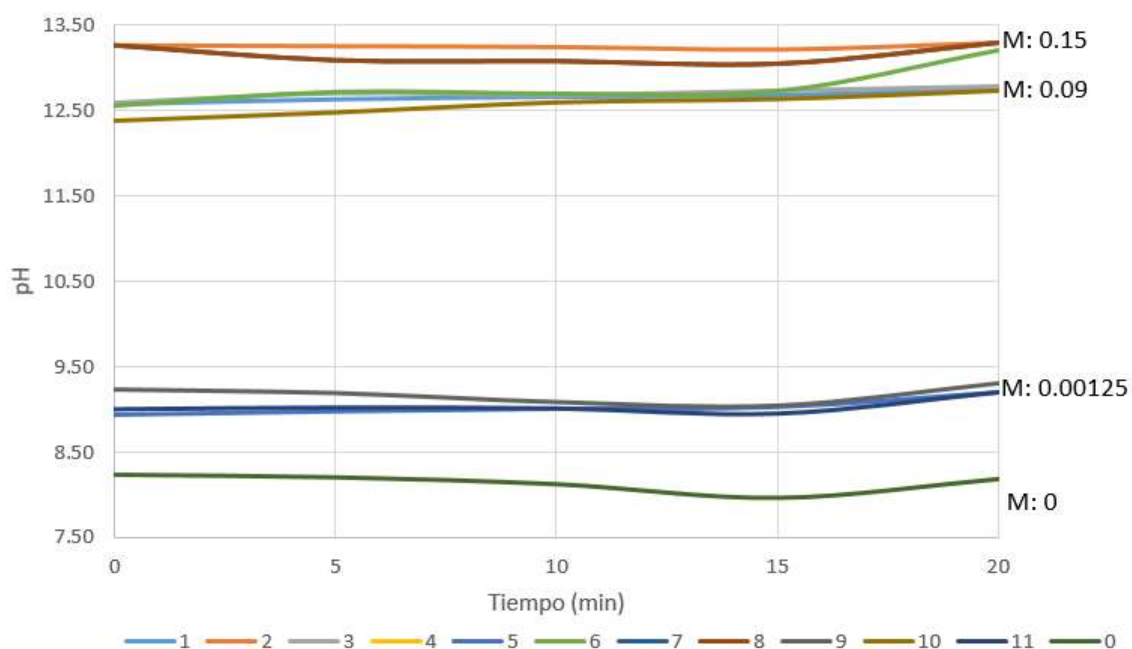


Figura 4.13. Comportamiento del pH durante la experimentación.

En la tabla 4.13. se puede observar la eficiencia en kWh/L del sistema para cada una de las combinaciones de los factores, así mismo el tiempo estimado para la producción de un litro de gas a temperatura ambiente y presión atmosférica. Donde se propone la prueba numero 7 como el punto más eficiente ya que, aunque no es el que ofrece un consumo más bajo si es el que genera el gas de forma considerablemente más rápido, lo cual podría indicar una eficiencia en el

tiempo de producción tres veces mayor al punto (8) de mayor eficiencia energética.

Tabla 4.12. Comparativa entre la eficiencia energética y el tiempo de producción de gas.

Orden Corrida	Voltaje (V)	NaOH (M)	Temperatura (° C)	Producción H ₂ (ml/15min)	Eficiencia (kWh/L)	Tiempo (h/L)
1	40	0.09	36	169	0.069	1.48
2	50	0.15	22	348	0.054	0.72
3	40	0.09	36	186	0.060	1.34
4	50	0.00125	22	4	0.125	62.50
5	30	0.00125	50	4	0.060	62.50
6	30	0.15	50	255	0.046	0.98
7	50	0.15	50	543	0.069	0.46
8	30	0.15	22	187	0.035	1.34
9	30	0.00125	22	3	0.084	100.00
10	40	0.09	36	166	0.069	1.51
11	50	0.00125	50	7	0.104	35.71
0	50	0.0	22	2	0.292	166.67

En la figura 4.14. se puede apreciar la eficiencia energética de cada prueba poniendo en contexto la prueba de referencia la cual tiene una concentración nula de electrolito siendo esta la de un mayor consumo energético por litro, así mismo poniendo en comparación el consumo energético contra el tiempo de producción los más eficientes fueron los que tenían la concentración de electrolito más alta.

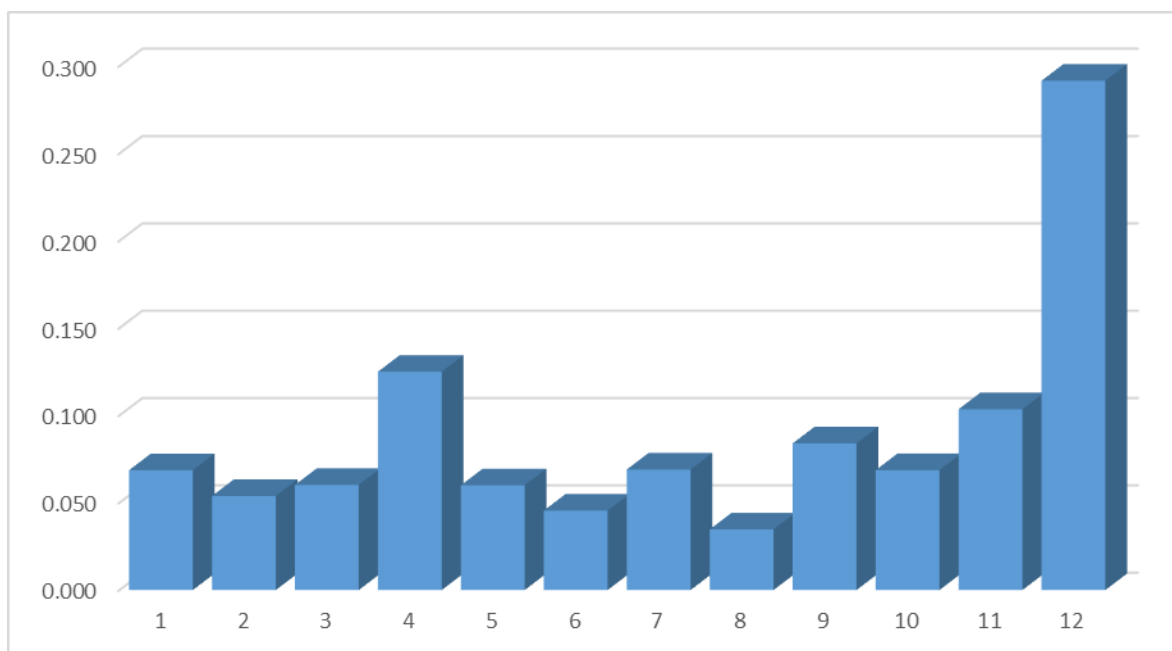


Figura 4.14. Gráfica de eficiencias energéticas (Kwh/L).

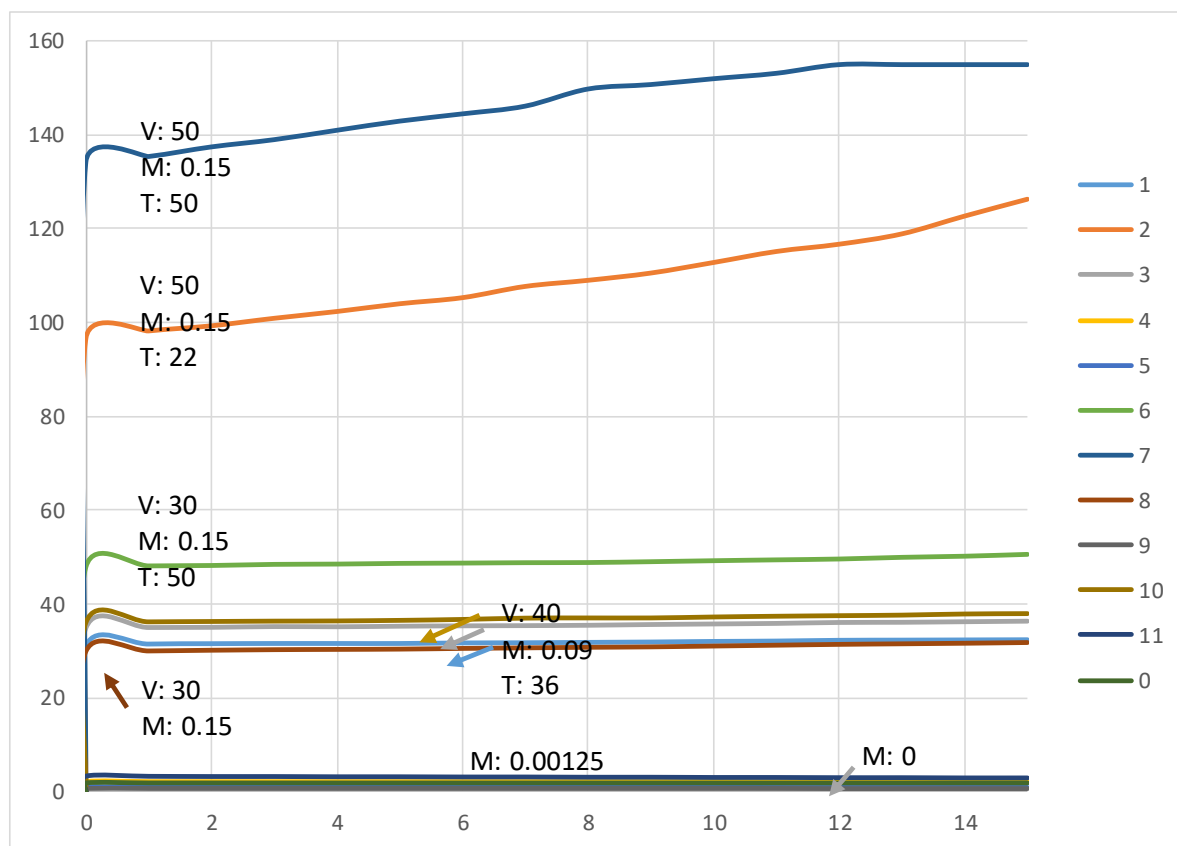


Figura 4.15. Tendencia del gasto energético.

En la figura 4.15. se puede comparar el gasto energético para cada una de las pruebas de electrólisis, donde se puede notar que la muestras con una concentración nula del electrolito fue la de menor gasto seguida de todas las muestras con una molaridad de 0.00125 debido a la baja conductividad en las soluciones, también se puede ver que la prueba que tuvo el gasto más elevado fue la que tenía el nivel más alto en los factores, siendo el punto 7 y 8 los más contrastantes al tener una diferencia considerable hablando en gasto energético aunque comparado con la eficiencia energética, el gasto esta va de la mano al tiempo de producción por lo que la eficiencia energética es más favorable en las pruebas con la concentración del electrolito elevado.

Se tomó como referencia la prueba 8 debido que en comparativa de la eficiencia y el tiempo de producción se consideró el mejor, se intentó predecir el tiempo que se tomaría en generar un kilogramo de hidrógeno si este se mantuviera estable durante todo el proceso, así mismo estimar la eficiencia energética y tener un punto de referencia para la comparación con proceso industriales.

Primeramente, se calculó la cantidad de moles por kg de hidrógeno y el volumen de que este ocupa.

1. Moles en 1 kg de hidrógeno

Masa molar del hidrógeno molecular:

$$M_{H_2} = 2g/mol$$

$$n = \frac{1000\ g}{2g/mol} = 500\ mol$$

2. Volumen a temperatura ambiente

Si:

$$1\ mol \approx 24\ L$$

Entonces:

$$V = 500\ mol * 24L/mol$$

$$V \approx 12000L$$

1 kg de gas hidrógeno equivale aproximadamente a:

$$12\ 000\ L = 12\ m^3$$

(a temperatura ambiente y presión atmosférica)

A temperatura ambiente, un kilogramo de hidrógeno gaseoso ocupa aproximadamente 12 m³, considerando un volumen molar de 24 L/mol.

De acuerdo a lo anterior si se generan 543 mL en 15 min usando los mismos supuestos que antes si el comportamiento fuese lineal:

1. Datos conocidos

Producción medida: 543 ml en 15 min

Objetivo: 1 kg de H₂ = 12 000 L = 12 000 000 ml

2. Tasa de producción

$$Tasa = \frac{543 \text{ ml}}{15 \text{ min}} = 36.2 \text{ ml/min}$$

3. Tiempo para producir 1 kg

$$t = \frac{12000000 \text{ ml}}{36.2 \text{ ml/min}}$$
$$t \approx 331500 \text{ min}$$

4. Conversión de tiempo

Minutos: 331 500 min

Horas: 5,525 h

Días: 230 días

A esa tasa de producción, se tardaría aproximadamente:

230 días (~7.6 meses) en generar 1 kg de hidrógeno.

Extrapolando la tasa experimental de producción (543 mL en 15 minutos), el tiempo estimado para producir un kilogramo de hidrógeno a temperatura ambiente sería del orden de 5,500 h.

Gasto energético

Corriente: 3.1 A

Voltaje: 50 V

Producción: 543 ml de H₂ en 15 min

Temperatura ambiente: 24 L/mol

1 kg H₂ ≈ 12 m³ = 12 000 L

Tiempo estimado para 1 kg ≈ 5 525 h

1. Potencia eléctrica del sistema

$$P = V * I$$

$$P = 50 * 3.1$$

$$P = 155 W$$

2. Energía eléctrica consumida para producir 1 kg de H₂

$$E_{in} = P * T$$

$$E_{in} = 155 W * 5525 h$$

$$E_{in} \approx 857\ 000 Wh = 857 Kwh$$

3. Energía química del hidrógeno producido

Usando el poder calorífico inferior (LHV), estándar en electrólisis:

$$LHV_{H_2} = 120 MJ/kg$$

Conversión a kWh:

$$120 MJ/3.6 = 33.3 kWh/kg$$

4. Eficiencia energética del proceso

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{consumida}}} \times 100$$

$$\eta = \frac{33.33}{857} \times 100$$

$$\eta \approx 3.9\%$$

La eficiencia energética del proceso es aproximadamente: 3.9%

Bajo las condiciones de operación evaluadas (50 V y 3.1 A), la eficiencia energética del sistema fue del orden del 4 %, lo que sugiere la presencia de importantes pérdidas eléctricas y electroquímicas.

Para tener una comparación más acertada con los procesos industriales se normalizan los resultados a 0° C (condiciones normales).

1. Corrección de volumen a 0° C

Usando la relación de los gases ideales (P constante):

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_0}{T_0}$$

Aquí:

$$V_1 = 543 \text{ ml a } 25^\circ \text{ C} = 298 \text{ K}$$

$$T_0 = 273K \text{ (0° C)}$$

$$V = \frac{273}{298} * 543$$

$$V \approx 497 \text{ ml}$$

2. Tasa de producción normalizada

Producción medida:

497 mL en 15min (0° C).

$$Tasa = \frac{497}{15}$$

$$Tasa \approx 33.1 \text{ ml/min}$$

3. Volumen de 1 kg de Hidrógeno a 0° C

A 0° C:

Volumen molar = 22.4 L/mol

$$1Kg \text{ H}_2 = 500 \text{ ml}$$

$$V_{1kg} = 500 * 22.4$$

$$V_{1kg} = 11200 \text{ L} = 11.2m^3$$

4. Tiempo para producir 1 kg (normalizado)

$$t = \frac{11200 \text{ ml}}{33.1 \text{ ml/min}}$$

$$t \approx 338000 \text{ min}$$

Conversiones:

Horas: $\approx 5\,630 \text{ h}$

Días: $\approx 235 \text{ días}$

5. Energía eléctrica consumida

$$P = 50 * 3.1$$

$$P = 155 \text{ W}$$

$$E_{in} = 155 * 5630$$

$$E_{in} \approx 873 \text{ kWh}$$

6. Eficiencia energética normalizada

Energía química del Hidrógeno (LHV, a 0° C es el mismo):

$$E_{H_2} = 33.3 \text{ kWh/kg}$$

$$\eta = \frac{33.3}{873} * 100$$

$$\eta \approx 3.8\%$$

Al normalizar los volúmenes de hidrógeno a condiciones normales (0° C y 1 atm), la eficiencia energética del proceso se mantiene cercana al 4 %, confirmando que las pérdidas del sistema están dominadas por factores eléctricos y electroquímicos más que por efectos termodinámicos, lo cual indica que el diseño aún se encuentra lejos de ser un proceso que sea replicable a nivel industrial, aunque estos resultados podrían ayudar a realizar un nuevo diseño de un electrolizador el cual permita un mejor flujo de electrones y una mayor densidad eléctrica en este, así mismo buscar materiales más afines a la reacción de evolución del hidrógeno.

5. CONCLUSIONES

Según los datos obtenidos y lo visto durante la experimentación se puede decir que se encontraron las combinaciones de mayor producción de hidrógeno en menor tiempo y las de mayor eficiencia energética por lo que se podría decir que la hipótesis fue correcta.

La producción de hidrógeno por medio de electrólisis en aguas de desecho puede ser viable para la producción en masa, para lo cual fue crucial encontrar los factores que son más influyentes durante dicha producción de los factores manipulados (NaOH, Voltaje, Temperatura) se pudo observar que la concentración de electrolito y la intensidad de corriente son los más influyentes durante la producción, sin embargo no se debe dejar de lado el material para los electrodos, se deberán buscar nuevas y mejores maneras de implementar metales que sean más afines a las reacciones.

La combinación de los materiales entre los electrodos sería clave para ayudar a la reacción de evolución del hidrógeno y oxígeno por lo que se deben buscar aleaciones en los electrodos que favorezcan tanto en la reacción como en la conductividad de los electrones, a su vez aumentar el área superficial en los electrodos para garantizar un desprendimiento más eficiente de las burbujas de gas generado durante la electrólisis por lo cual es fundamental estudiar más a fondo la forma de los electrodos y así hacer más eficiente el proceso sin aumentar considerablemente los costos de operación.

El agregar agentes metálicos a la solución se presentó como una opción con la finalidad de mejorar la conductividad de la solución, pero según lo visto durante la experimentación esto es contraproducente ya que estas partículas estarían actuando como electrodos flotantes o electrodos de sacrificio los cuales podrían generar microcorrientes eléctricas y reacciones intermedias por lo que el transporte de iones se ralentiza, además que al usar materiales poco resistentes a la corrosión puede generar óxidos como subproducto no deseado ya que estos entorpecerían aún más el transporte de iones.

Si bien el resultado es una reacción química para la separación del agua en gases hidrógeno y oxígeno el proceso es más físico ya que este depende del transporte de iones y electrones, por lo que se propone una ruta de reacción simple

($4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$) la cual sería una consecuencia al cual nos da como resultado la obtención de los gases de hidrógeno y oxígeno.

La falta de potencial eléctrico fue clave para obtener una producción de hidrógeno que todavía no compite con los electrolizadores industriales por su eficiencia del 60-70% de eficiencia contra el obtenido de 4% parece estar bastante alejado de ser competitivo pero las bases están sembradas y tomando en cuenta los puntos mencionados anteriormente, si se disminuye la resistencia al transporte iónico se podría tener un aumento considerable en la producción de hidrógeno.

Se propone mejorar el diseño del reactor utilizado durante las pruebas realizadas para garantizar un transporte de electrones más directa y eficiente la cual se vería reflejada directamente en la producción de hidrógeno.

Referencias bibliográficas

- Adepoju, E. B. (2013). Methanolysis optimization of sesame (*Sesamum indicum*) oil to biodiesel and fuel quality characterization. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 49.
- Agency, I. E. (2008). IEA Energy Policies Review: The European Union. *OECD Publishing*.
- Angeles-Olvera Z, C.-Y. A.-D. (2022). Nickel-Based Electrocatalysts for Water Electrolysis. *Energies*.
- Balat, M. (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. *Energy Conversion and Management*, 1479-1492.
- Brauns, T. a. (2020). Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review. *processes*.
- Breidenich, C. M. (1998). The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *American Journal of International Law*.
- Cole, R. K. (1994). Nitrous oxide: sources, sampling, and science policy. *Environmental Science & Technology*, 149-202.
- Cristina L. Archer, M. Z. (2005). Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Gitay, H. (2002). Change Climate. *Biodiversity IPCC Technical*.
- International Energy Agency. (2006). Energy technology perspectives. *Office of Energy Technology, R&D. and Group of Eight (Organization)*.
- Jun Chi a, b. H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen. *elservier*, 390-394.
- Kai Zeng, D. Z. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *ELSEVIER*, 307-326.
- Martin, D. c. (2021). Electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction in alkaline and neutral. *ELSEVIER*.
- Masson-Delmotte V, Z. P. (2018). Global Warming of 1.5 OC: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of strengthening the global response to the thread of climate chang. *Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization*.
- Qusay Hassan, A. Z. (2023). Large-scale green hydrogen production using. *Energy Harvesting and system*.
- Robin, E. S. (2005). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

- Smithson, P. (2001). Climate change 2001. Contributio Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University UK*:.
Turner, J. A. (2004). Sustainable Hydrogen Production. *Science*, 972-974.
Vera, M. I. (2007). *Electroquimico*. Argentina: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura .
Yin, S. (2025). Challenges and future directions for green hydrogen. *academy green energy*.
Zinola, F. (2007). *Electroquimica Fundamental y aplicaciones*. montevideo: Facultad de Ciencias.
Zi-You Yu, Y. D.-Y.-R.-H. (2021). Clean and Affordable Hydrogen Fuel from Alkaline Water . *advanced materials*.

Uriel Gómez Rodríguez

Condiciones de operación de un reactor de laboratorio para generar hidrogeno por medio de electrolisis de agua con pH b...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:595244110

Fecha de entrega

28 may 2026, 7:26 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

28 may 2026, 7:28 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Condiciones de operación de un reactor de laboratorio para generar hidrogeno por medio de ele....pdf

Tamaño del archivo

2.6 MB

80 páginas

16.133 palabras

96.113 caracteres

26% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 25%  Fuentes de Internet
- 9%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en ciencias en ingeniería química	
Título del trabajo	Condiciones de operación de un reactor de laboratorio para generar hidrogeno por medio de electrolisis de agua con pH básico	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Uriel Gómez Rodríguez	1612366H@umich.mx
Director	Rafael Maya Yescas	rafael.maya.yescas@umich.mx
Codirector	Gladys Jiménez García	gjimenez@itspa.edu.mx
Coordinador del programa	Agustín Jaime Castro Montoya	mae.cs.ingenieria.quimica@umich.mx

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	
Traducción al español	Si	Traducción de artículos al español
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	Si	Ayuda en comprensión de cálculos
Búsqueda y organización de información	Si	Ayuda en búsqueda de artículos científicos
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Uriel Gómez Rodríguez 
Lugar y fecha	Morelia Michoacán, a 27 de mayo del 2026