

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado



Análisis experimental de los parámetros eléctricos en la
generación de hidrógeno mediante electrólisis de agua alcalina

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestría en Ingeniería Mecánica con Orientación Terminal en
Termofluidos

Presenta:

Ing. Francisco Alejandro Jiménez Becerra

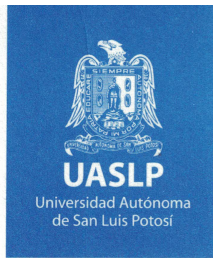
Asesor:

Dr. Francisco Oviedo Tolentino

Coasesor:

Dr. Marcos Loredo Tovías





FACULTAD DE
INGENIERÍA

19 de mayo de 2022

**ING. FRANCISCO ALEJANDRO JIMÉNEZ BECERRA
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Francisco Oviedo Tolentino y Marcos Loredo Tovías**, Asesor y Coasesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería Mecánica con Orientación Terminal en Termofluidos**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Análisis experimental de los parámetros eléctricos en la generación de hidrógeno mediante electrólisis de agua alcalina”

Introducción.

1. Tecnologías en la producción de hidrógeno.
 2. Fundamentos de la electrólisis del agua.
 3. Caracterización experimental de la celda electrolítica.
 4. Resultados energéticos en la producción de hidrógeno.
- Conclusiones.
Referencias.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E


DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Copia. Archivo
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria - CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área de Investigación y Estudios de Posgrado

Aclaración

El presente trabajo que lleva por título:

“Análisis experimental de los parámetros eléctricos en la generación de hidrógeno mediante electrólisis de agua alcalina”

se realizó en el periodo enero de 2020 a abril de 2022 bajo la dirección del Dr. Francisco Oviedo Tolentino y del Dr. Marcos Loredo Tovías.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este documento y asume la responsabilidad total del mismo.

Este documento no ha sido sometido como tesis a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento de Tesis para fines académicos.

Francisco Alejandro Jiménez Becerra

RESUMEN

La actual problemática mundial del cambio climático es causada por la huella de carbono que proviene de las actividades humanas. La necesidad ha llevado a los países a adoptar políticas que aumentan la cuota de utilización de energía proveniente de tecnologías verdes. La tecnología del hidrógeno representa un vector energético con mayor potencial en el futuro. La electrólisis del agua representa una importante componente en el campo de la tecnología para la generación de hidrógeno.

La intermitencia de las tecnologías renovables (solar, eólica etc.) es una desventaja que puede ser afrontada mediante el uso del hidrógeno. La intermitencia puede ser resuelta aprovechando la relación que existe entre el hidrógeno y la energía eléctrica. Es decir, el hidrógeno puede ser convertido en energía eléctrica mediante las pilas de combustible de hidrógeno. De esta manera se concibe la generación de hidrógeno mediante electrólisis del agua bajo condiciones de baja demanda de energía eléctrica, para posteriormente recuperar la energía en condiciones no funcionales en las tecnologías verdes.

En este trabajo se realiza el estudio experimental con la finalidad de revelar aspectos óptimos para la producción del hidrógeno como función de las variables eléctricas. La problemática enfrentada por la mayoría de las investigaciones radica en la complejidad de generar un sistema robusto de adquisición de datos.

Este estudio experimental considera el desarrollo de una celda electrolítica de agua alcalina. La celda está configurada con base en electrodos de carbón. La alcalinidad fue obtenida mediante el uso de hidróxido de sodio como par redox. Se registraron las señales (voltaje, corriente eléctrica y temperatura) mediante un sistema electrónico de adquisición de datos. La celda permite modificar la distancia entre los electrodos, la concentración de la sustancia y la diferencia de potencial entre los electrodos.

La metodología incorpora un diseño experimental factorial, el cual considera tres factores de interés. Los factores seleccionados son: la concentración molar del electrolito, la diferencia de potencial y frecuencia de onda rectangular. El objetivo de este estudio es identificar los parámetros que generan mejor desempeño y costo de producción del hidrógeno.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el desempeño y costo de producción del hidrógeno se encuentran son afectados principalmente por el diferencial de voltaje y la concentración. Los indicadores de eficiencia de celda derivados de la segunda ley y eficiencia de Faraday, no conducen a la identificación de valores operativos óptimos. Se desarrollaron dos variables de salida (parámetro de desempeño y costo de producción) y se logra identificar estados de operación óptimos. El parámetro de desempeño presenta oscilaciones como función de la concentración generando estados que muestran igual desempeño; aunque se muestra una diferencia en la tasa de producción de hidrógeno.

Agradecimientos

A mis padres, por todo su apoyo incondicional, por todo el cariño, preocupación, su afecto, su comprensión cuando no los pude acompañar en los eventos familiares y en general por estar al pendiente de mí en todo momento.

A mi asesor de tesis, el Dr. Francisco Oviedo Tolentino por toda su orientación, por sus recomendaciones, por sus reflexiones, por su tiempo, por su dedicación, por compartirme una parte de su gran calidad profesional y humana, y por ser uno de los principales responsables para que este proyecto finalizara en buenos términos.

Al Dr. Marcos Loredo Tovías, no solo por haber sido parte primordial en la concepción del proyecto, sino por todo su apoyo y disponibilidad en compartirme el amplio conocimiento que posee sobre el tema.

Al Dr. Raúl Ignacio Hernández Molinar, por sus asesorías, observaciones y colaboración para la realización del proyecto.

Al M. Miguel Ángel Gallegos Guerrero, por sus recomendaciones basadas en su largo andamiaje profesional.

También agradezco al Dr. Dirk Frederik De Lange, al Dr. Ricardo Romero Méndez, a la Dra. Geydy Luz Gutiérrez Urueta y al Dr. Francisco Gerardo Pérez Gutiérrez por formar parte del comité evaluador, ya que sus comentarios y retroalimentación han sido importantes en el desarrollo de la presente tesis.

Índice general

Resumen	I
Agradecimientos	III
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XI
Introducción	1
1. Tecnologías en la producción de hidrógeno	7
1.1. Contexto de la energía en el mundo	7
1.1.1. Combustibles fósiles	11
1.2. El hidrógeno como un vector energético	12
1.2.1. Métodos de almacenamiento de energía	13
1.3. Economía del hidrógeno	14
1.3.1. Costos de producción del hidrógeno	15
1.3.2. Almacenamiento y transporte del hidrógeno	15
1.4. El hidrógeno a través de la historia	16
1.5. Tecnologías actuales de separación de hidrógeno	17
1.5.1. Investigación en la actualidad	17
2. Fundamentos de la electrólisis del agua	19
2.1. Fundamentos químicos	19
2.1.1. Iones	20
2.1.2. Compuesto iónico	22
2.1.3. Iones poliatómicos	23
2.1.4. Reacciones oxidación-reducción	23
2.1.5. Electrodo	24
2.1.6. Celdas electrolíticas	25

ÍNDICE GENERAL

2.1.7.	Clasificación de celdas electrolíticas	27
2.1.7.1.	Celda de electrólisis alcalina (AEC)	28
2.1.7.2.	Celda de electrólisis alcalina usando electrodo de hidróxido de níquel	29
2.1.7.3.	Celdas de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)	30
2.1.7.4.	Celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC).	31
2.2.	Fundamentos de la electrólisis	31
2.2.1.	Termodinámica de la electrólisis	33
2.2.2.	Criterio operacional de selección de temperatura	34
3.	Caracterización experimental de la celda electrolítica	37
3.1.	Modelo experimental	37
3.2.	Medición de los gases	38
3.2.1.	Ajuste del menisco	39
3.3.	Procedimiento experimental	40
3.3.1.	Flujo volumétrico de hidrógeno	40
3.3.2.	Voltaje y corriente de la celda	41
3.3.3.	Temperatura ambiental y temperatura de la celda	41
3.4.	Elementos de la celda de electrólisis	41
3.4.1.	Electrodos	41
3.4.2.	Electrolito	42
3.4.3.	Sistema eléctrico	45
3.4.3.1.	Fuente de alimentación	46
3.4.3.2.	Modulación por ancho de pulsos PWM	46
3.4.3.3.	Transistor Mosfet	47
3.4.3.4.	Control eléctrico	48
3.4.4.	Sensores	51
3.4.4.1.	Temperatura del electrolito	51
3.4.4.2.	Temperatura ambiental	52
3.4.4.3.	Sensor de Voltaje	52
3.4.4.4.	Sensor de Corriente	54
3.4.4.5.	Calibración de sensores de medición	55
3.4.4.6.	Tarjeta de adquisición de datos DAQ	56
3.4.4.7.	Software Labview	57
3.4.4.8.	Tarjeta Arduino	59
3.5.	Preparación de la celda	60

3.6. Hipótesis de diseño de experimentos	61
3.7. Metodología experimental	62
4. Resultados energéticos en la producción de hidrógeno	63
4.1. Resultados y discusión	63
4.1.1. Modelo lineal generalizado para flujo volumétrico	63
4.1.2. Modelo lineal generalizado para corriente	64
4.1.3. Modelo lineal generalizado para parámetro de desempeño	65
4.1.4. Flujo volumétrico de hidrógeno como función de la concentración	66
4.1.5. Eficiencias de Faraday en la producción de hidrógeno	67
4.1.6. Parámetro de desempeño en función de la concentración	68
4.1.7. Costo eléctrico por unidad de kilogramo de hidrógeno	69
4.2. Análisis de efectos principales	71
4.2.1. Gráfico de efectos principales para flujo volumétrico	71
4.2.2. Gráfico de efectos principales para corriente	73
4.2.3. Efectos principales para costo eléctrico por unidad de kilogramo de hidrógeno	74
4.2.4. Grafica de efectos principales para eficiencia beta	75
4.3. Experimentos con electrodo de hidróxido de níquel	76
4.3.1. Desarrollo de electrodo de hidróxido de níquel	77
4.3.1.1. Fabricación del electrodo mediante compactación	77
4.3.1.2. Fabricación del electrodo mediante un contenedor	78
4.3.1.3. Fabricación del electrodo mediante una mezcla	79
4.3.1.4. Fabricación del electrodo mediante disolución	80
Conclusiones	83
A. Matriz de experimentación.	85
A.1. Matriz de experimentación	86
Referencias	87

Índice de figuras

1.1. Producción de energía por fuente. (datos obtenidos de [13]).	8
1.2. Emisiones desglosadas (datos obtenidos de [13]).	9
1.3. Promedio mensual global de dióxido de carbono (datos obtenidos de [15]).	10
1.4. Consumo global de energía (datos obtenidos de [13]).	11
1.5. Producción centralizada vs producción descentralizada (figura adaptada de [19]).	14
1.6. Métodos de producción de hidrógeno (Figura adaptada de [22]).	17
2.1. Esquema de iones (Figura adaptada de [31]).	21
2.2. Esquema de balance compuesto iónico (Figura adaptada de [31]).	22
2.3. Electrolito fuerte y débil (Figura adaptada de [31]).	24
2.4. Esquema celda electrolítica.	27
2.5. Hidróxido de níquel como electrodo (Figura de []).	30
2.6. $\Delta G(T)$, $\Delta H(T)$ y $T\Delta S(T)$ de la reacción de disociación del agua. (Figura de [45]).	35
3.1. Modelo experimental.	38
3.2. Postura correcta para la medición del menisco.	39
3.3. Montaje físico de embudos.	40
3.4. Electrodo de grafito.	42
3.5. Balanza analítica.	43
3.6. Conductímetro.	44
3.7. Conductividad promedio.	45
3.8. A) Señal frecuenciada, B) Señal constante.	45
3.9. Fuente de alimentación.	46
3.10. Generador PWM.	47
3.11. Transistor Mosfet.	47
3.12. PLC Logo!.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

3.13. Contactores.	49
3.14. Esquema del control eléctrico.	50
3.15. Sensor DS18B20.	51
3.16. Tarjeta Arduino Mega.	52
3.17. Sensor DTH11.	52
3.18. Divisor de voltaje.	53
3.19. Módulo comercial divisor de voltaje.	53
3.20. Resistencia Shunt.	54
3.21. Amplificador de instrumentación.	55
3.22. Osciloscopio.	55
3.23. Módulo NI-9215.	56
3.24. Cable coaxial RG58.	57
3.25. Chasis cDAQ-9178.	57
3.26. Interfaz de usuario.	58
3.27. Código Labview.	59
3.28. Montaje de sensores digitales.	60
3.29. Cámara de flujo laminar.	61
4.1. Flujo volumétrico vs Concentración molar.	67
4.2. Eficiencia de Faraday vs Concentración molar.	68
4.3. Parámetro de desempeño vs Concentracion Molar.	69
4.4. Costo eléctrico por unidad de kilogramo de hidrógeno.	70
4.5. Efectos principales para flujo volumétrico.	72
4.6. Efectos principales para flujo corriente eléctrica.	74
4.7. Efectos principales para el costo eléctrico por unidad de kilogramo.	75
4.8. Efectos principales para eficiencia beta.	76
4.9. Electrodo de hidróxido de níquel por compresión.	78
4.10. Contenedor con base de níquel.	79
4.11. Electrodo hidróxido de níquel-teflón.	80
4.12. Celda de electrólisis con 3 electrodos montados.	81

Índice de tablas

1.1.	Dióxido de carbono generado (datos obtenidos de [17]).	12
1.2.	Costos de almacenamiento de energía (datos obtenidos de [17]).	13
1.3.	Comparativo costo de baterías (datos obtenidos de [17]).	13
1.4.	Costos de producción del hidrógeno (datos obtenidos de [19]).	15
1.5.	Hidrógeno vs combustibles fósiles (datos obtenidos de [20]).	16
1.6.	Investigaciones relevantes sobre la electrólisis	18
3.1.	Propiedades de los electrodos de grafito.	42
3.2.	Concentraciones del electrolito.	44
3.3.	Tabla de verdad del control eléctrico.	50
3.4.	Listado parámetros experimentales.	62
3.5.	Matriz experimental.	62
4.1.	Análisis de varianza para flujo volumétrico.	63
4.2.	ANOVA para flujo volumétrico.	64
4.3.	Análisis de varianza para corriente.	64
4.4.	ANOVA para corriente.	65
4.5.	Análisis de varianza para parámetro de desempeño.	65
4.6.	ANOVA para parámetro de desempeño.	66

Introducción

El sistema energético mundial debe desplegar una profunda transformación sin precedentes para alcanzar los objetivos del acuerdo de París. Es inaudible, que la energía es considerada como una necesidad para lograr que la sociedad continúe en la búsqueda de su bienestar. Aproximadamente el 80 % de la demanda mundial de energía se satisface con combustibles fósiles no renovables [1]. Los combustibles fósiles generan emisiones contaminantes produciendo calentamiento global con daños a la salud y al ambiente.

Para satisfacer la creciente demanda mundial de energía y, al mismo tiempo, lograr la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, con el propósito de evitar depender de la extracción y empleo del petróleo, el carbón y el gas natural; es esencial el desarrollo de estrategias orientadas a fuentes de energía que sean sostenibles. En este contexto, la electricidad con bajas emisiones de carbono proveniente de energías renovables puede convertirse en el portador de energía preferido. La proporción de electricidad renovable en todo el mundo debería aumentar al 40 % en 2050 (desde aproximadamente el 4 % en 2015) [2].

El hidrógeno (H_2) ha sido considerado como una fuente de energía ideal. Se trata de un combustible limpio y con elevada densidad energética. Además, es importante mencionar que la producción flexible de H_2 a través de la electrólisis se puede realizar mediante la integración rentable de altos porcentajes de energía renovable en el sistema eléctrico [3].

La electricidad renovable se puede utilizar para producir hidrógeno a través de la electrólisis del agua; un proceso bien conocido que divide el agua acidificada o alcalinizada en H_2 y O_2 ultra puros (99.998 % de pureza) [4]. Dicho H_2 electrolítico se puede emplear posteriormente como materia prima limpia. Sectores como el químico y el transporte requieren urgentemente alternativas que coadyuden a la reducción de

sus impactos ambientales [5]. La electrólisis del agua representa una tecnología alternativa y actualmente proporciona el 4 % del suministro mundial de hidrógeno [6].

Aunque la electrólisis del agua ya es una tecnología de producción de hidrógeno bien establecida desde hace casi un siglo [7], su implementación para la producción en gran escala se ha visto obstaculizada principalmente por cuestiones de costos. En una revisión reciente, el costo de producción del hidrógeno varía desde aproximadamente 2.0 €/kg mediante un método de reformado de metano con vapor SMR a 20 €/kg cuando se produce de manera experimental mediante electrólisis tradicional [8].

El gobierno de Estados Unidos, a través de su Departamento de Energía (DOE por sus siglas en inglés) recomienda que el costo de producción, entrega y distribución de hidrógeno se encuentre entre 2.00 a 3.00 \$/kg [9]. El rango económico propuesto por el DOE estima que bajo estas condiciones el hidrógeno puede ser competitivo en costos con los combustibles derivados del petróleo [10]. Es importante tomar en cuenta que se trata de considerar energías que sean fáciles de adquirir, confiables y que se caractericen por no dañar el medio ambiente. Este es un reto importante para los gobiernos en la primera mitad del siglo. Se estima que para el año 2050 la población mundial ascienda a las 8.9 mil millones de individuos, aumentando el consumo global de energía primaria a 837 quads (1 quad= 1.06×10^{18} J) en el mismo período de tiempo. Solo en Estados Unidos, se espera que el consumo de energía se incremente de 102 a casi 200 quads en 2050 [10].

La sociedad deberá ser sensible y comprender que es necesario el empleo de productos que no impactan negativamente en la huella de carbono. Por esta razón se utilizan con mayor frecuencia en viviendas y pequeños negocios, sistemas de suministro energético ecológicos como son los paneles solares. En México el proveedor gubernamental de energía eléctrica, la CFE, permite realizar la interconexión del sistema de paneles solares con la red que ellos proporcionan. Esto proporciona al usuario la capacidad de usar la energía proveniente de CFE solamente cuando los paneles solares no cubren la totalidad del consumo del usuario. Por otra parte, si la producción de energía de los paneles sobrepasa el consumo, se tienen dos opciones: una es reinyectar la energía a la red, generando una disminución en el recibo de pago, la otra consiste en almacenar esta energía para reutilizarla cuando sea necesaria.

El uso de electricidad renovable para electrolizar el agua para la producción de hidrógeno es el método de generación de energía más convincente, entre las diferentes tecnologías de energía electroquímicas disponibles. Consecuentemente, el desarrollo de tecnologías de electrólisis de agua para la producción de H_2 es de gran urgencia e importancia [1]. La reacción electroquímica de separación del agua consta de dos reacciones principales, la reacción de desprendimiento de hidrógeno (HER, por sus siglas en inglés) en el cátodo y la reacción de desprendimiento de oxígeno (OER, por sus siglas en inglés) en el ánodo [11]. Para maximizar la eficiencia energética de la producción de hidrógeno, los electrodos, deben trabajar a un sobrepotencial bajo y condiciones de estabilidad por tiempos prolongados [12]. Es conveniente emplear electrodos eficientes con características estructurales óptimas para generar una cantidad adecuada de hidrógeno.

Los sistemas de electrólisis se clasifican en función de su electrolito. En el presente trabajo se utilizará la electrólisis de agua alcalina (AWE, por sus siglas en inglés) debido a que constituye la tecnología más robusta, económica y extendida en la actualidad a bajas temperaturas (4-90°C) [12].

El hidrógeno se considera a menudo el mejor medio para almacenar energía procedente de fuentes de energía renovable. Por lo tanto, esta investigación se propone estudiar la transformación de la energía eléctrica en energía química mediante la electrólisis del agua. Los parámetros para evaluar el desempeño es el voltaje, corriente eléctrica, frecuencia rectangular de onda y concentración del electrolito. Se evaluó el desempeño de la celda mediante eficiencia de Faraday y dos parámetros propuestos: un parámetro económico y un parámetro de desempeño. Los parámetros de desempeño propuestos logran integrar la influencia de todas las variables involucradas.

Hipótesis de la investigación

Existen parámetros eléctricos que optimizan la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua.

Objetivo general

Diseñar y fabricar una celda experimental de electrólisis de agua alcalina (AWE). Evaluar energéticamente el desempeño de la celda, determinando aspectos operativos

óptimos para la producción de hidrógeno.

Objetivos específicos

- Diseñar la metodología experimental.
- Diseñar y fabricar una celda electrolítica.
- Construir un sistema de adquisición de datos para evaluar las variables eléctricas.
- Calibrar el sistema de adquisición de datos.
- Realizar experimentos considerando distintas concentraciones empleando el método convencional.
- Evaluar los resultados obtenidos.

Para lograr los objetivos, el presente trabajo de tesis se encuentra organizado de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se presenta el marco teórico relacionando los conceptos de la energía en el mundo. Se discute la problemática actual de la contaminación ambiental generada por los procesos de generación de energía y su transporte. Se expone la tecnología del hidrógeno como solución a estos problemas y se explora a través de las investigaciones de vanguardia asociadas al proceso histórico de generación de este gas.

En el capítulo 2 se abordan los fundamentos de la generación de hidrógeno y se realiza una revisión de los principales procesos de separación del hidrógeno. Se analiza termodinámicamente la celda con la finalidad de definir parámetros que representen el desempeño de la celda.

En el capítulo 3 se describe el ensamble de la celda electrolítica, parámetros geométricos y tipos de materiales. Se describe el sistema de adquisición de datos y se presenta la metodología experimental utilizada.

En el capítulo 4 se discuten los resultados generados, los cuales están relacionados con el desempeño de la celda electrolítica. Se compara la influencia de las variables de interés en las variables respuesta seleccionadas.

Finalmente, se exponen las conclusiones relacionadas con los puntos operativos de la celda, los costos de producción de hidrógeno y proponen recomendaciones para optimizar la producción del hidrógeno.

Capítulo 1

Tecnologías en la producción de hidrógeno

1.1. Contexto de la energía en el mundo

Los datos más recientes publicados por la organización para la cooperación y el desarrollo económico (OCDE) indican que la producción mundial de energía se basa en la quema de combustibles fósiles. El petróleo, el carbón y gas natural representan en su conjunto un 80.0 % de la producción total de energía, mientras que las energías renovables representan solo el 15.0 %, siendo el restante 5.0 % de origen nuclear [13]. En la Figura 1.1 se pueden observar los últimos 10 años de la producción global de energía por fuente.

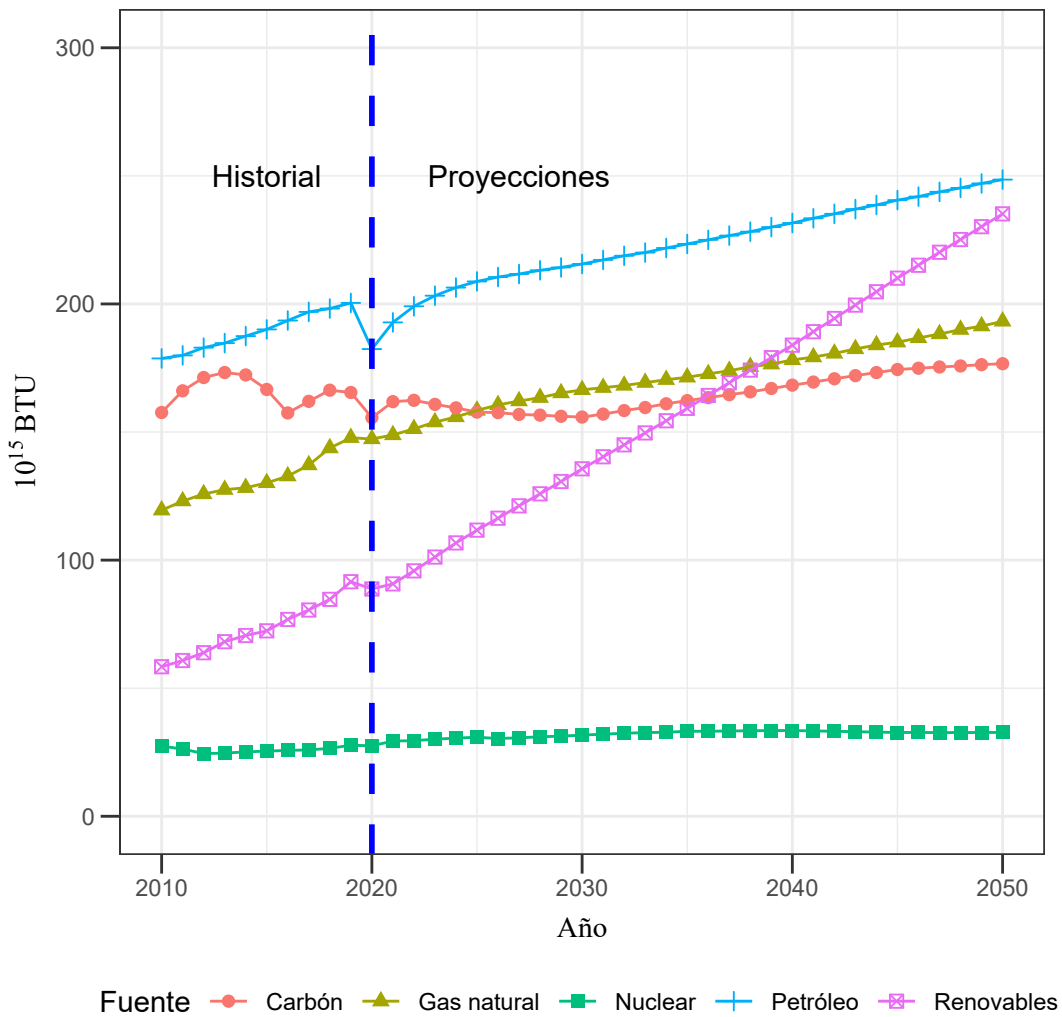


Figura 1.1: Producción de energía por fuente. (datos obtenidos de [13]).

En el 2015 a partir del acuerdo de París, 192 países pactaron aumentar esfuerzos para detener el calentamiento global y evitar que éste supere los $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto a la temperatura de la época preindustrial, reduciendo las emisiones de carbono en un 45.0% para el 2030 y cerca de cero para 2050 [14].

En la Figura 1.2 se puede observar un historial de los incrementos de las emisiones globales derivadas de la producción de energía eléctrica, donde el petróleo, el carbón y el gas natural son las principales fuentes de emisiones contaminantes.

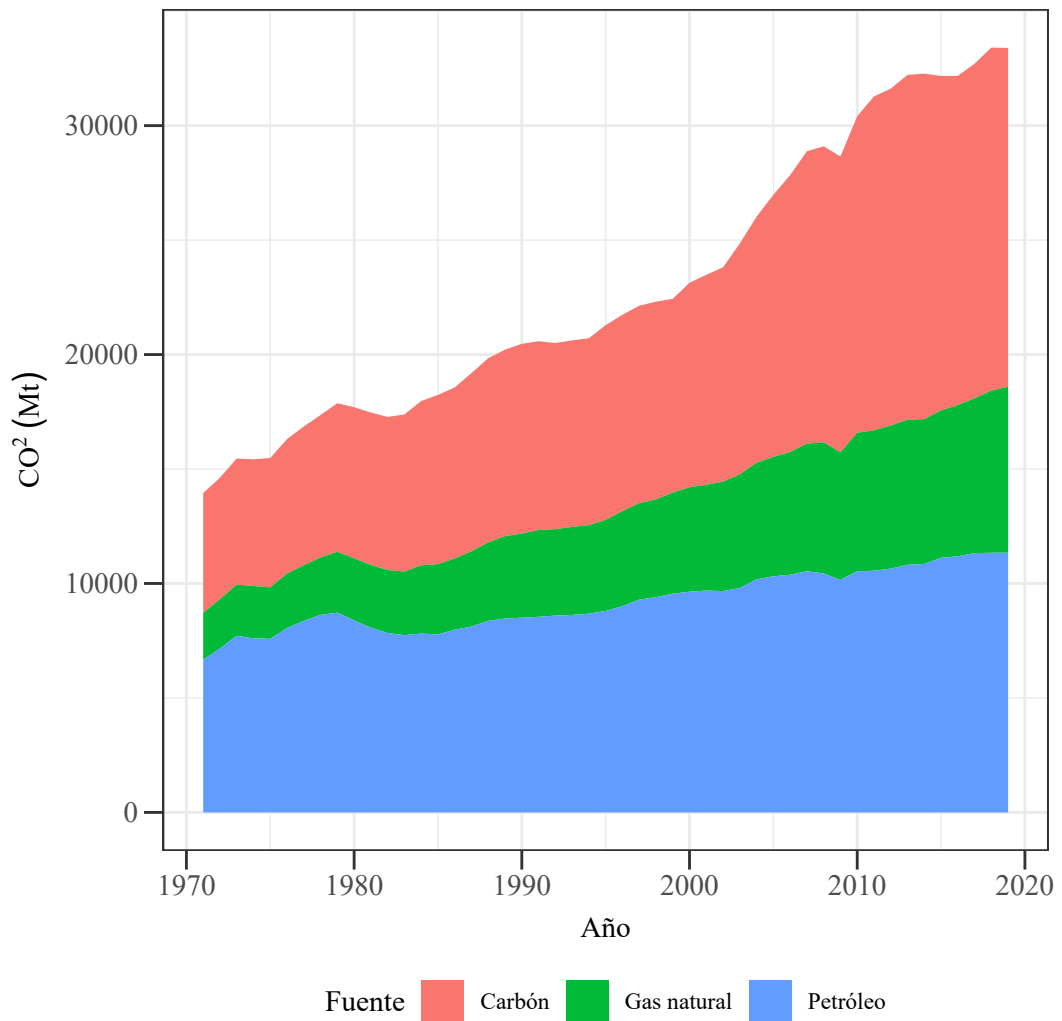


Figura 1.2: Emisiones desglosadas (datos obtenidos de [13]).

Recientes datos publicados por el laboratorio de monitoreo global (GML) de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), los cuales son mostrados en la Figura 1.3, indican que la concentración global promedio de dióxido de carbono (CO₂) llegó a los 414.0 ppm [15]. Este dato resulta alarmante debido a que la administración de la información de la energía de U.S. (EIA) proyecta que si los niveles de CO₂ alcanzan los 450.0 ppm, se llegaría al punto crítico donde el calentamiento global alcanzaría los 2.0 °C.

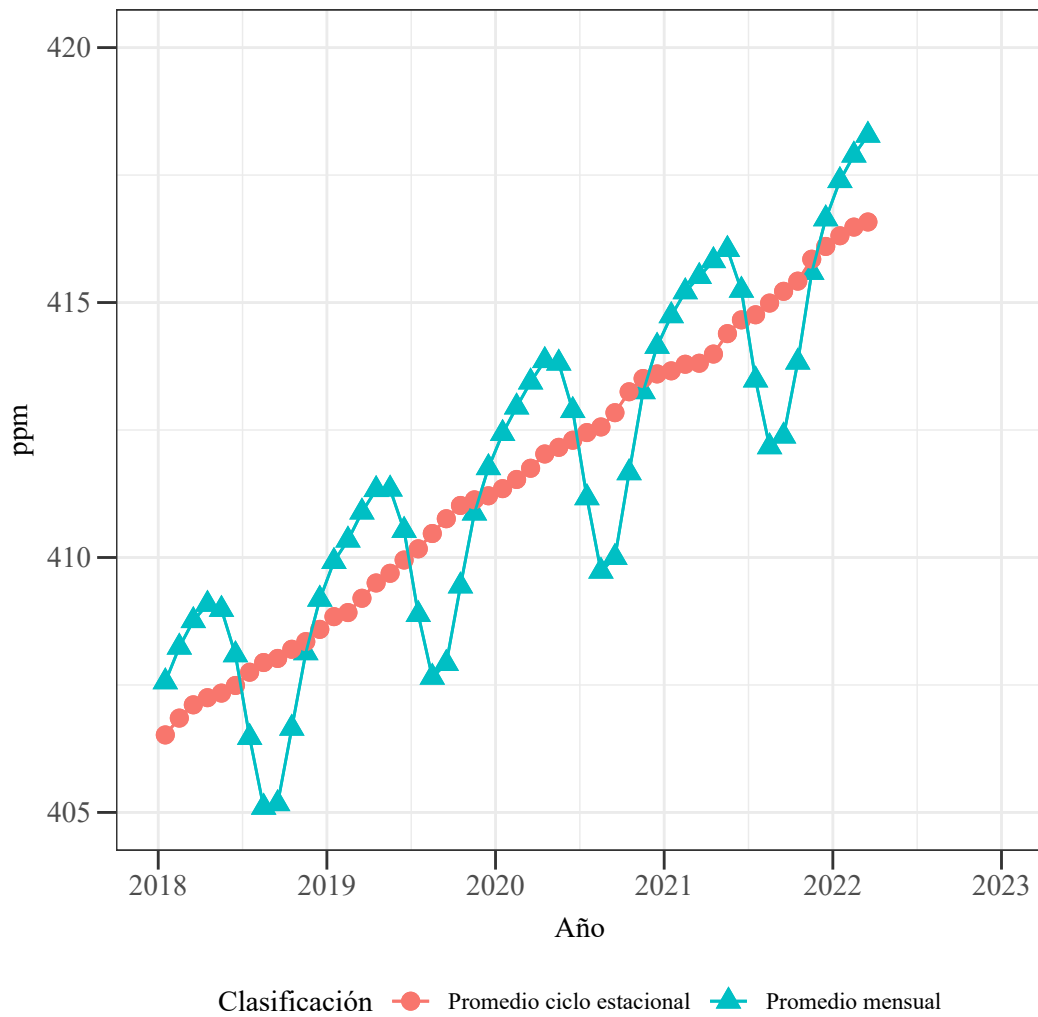


Figura 1.3: Promedio mensual global de dióxido de carbono (datos obtenidos de [15]).

De acuerdo con datos de la administración de la información de la energía de U.S. (EIA), bajo las condiciones de un caso de referencia de estudio; el uso global de energía proyectado en 2050 incrementará alrededor del 48 % en comparación con el año 2020, pasando de un consumo de 601.5 PBTU en 2020 a 886.3 PBTU [16].

En la Figura 1.4 se observa que las proyecciones de la EIA muestran un crecimiento modesto en países pertenecientes de la OECD y un crecimiento mayor en países no pertenecientes; esto es debido a que se proyecta un crecimiento en la población de países asiáticos, en particular China y la India.

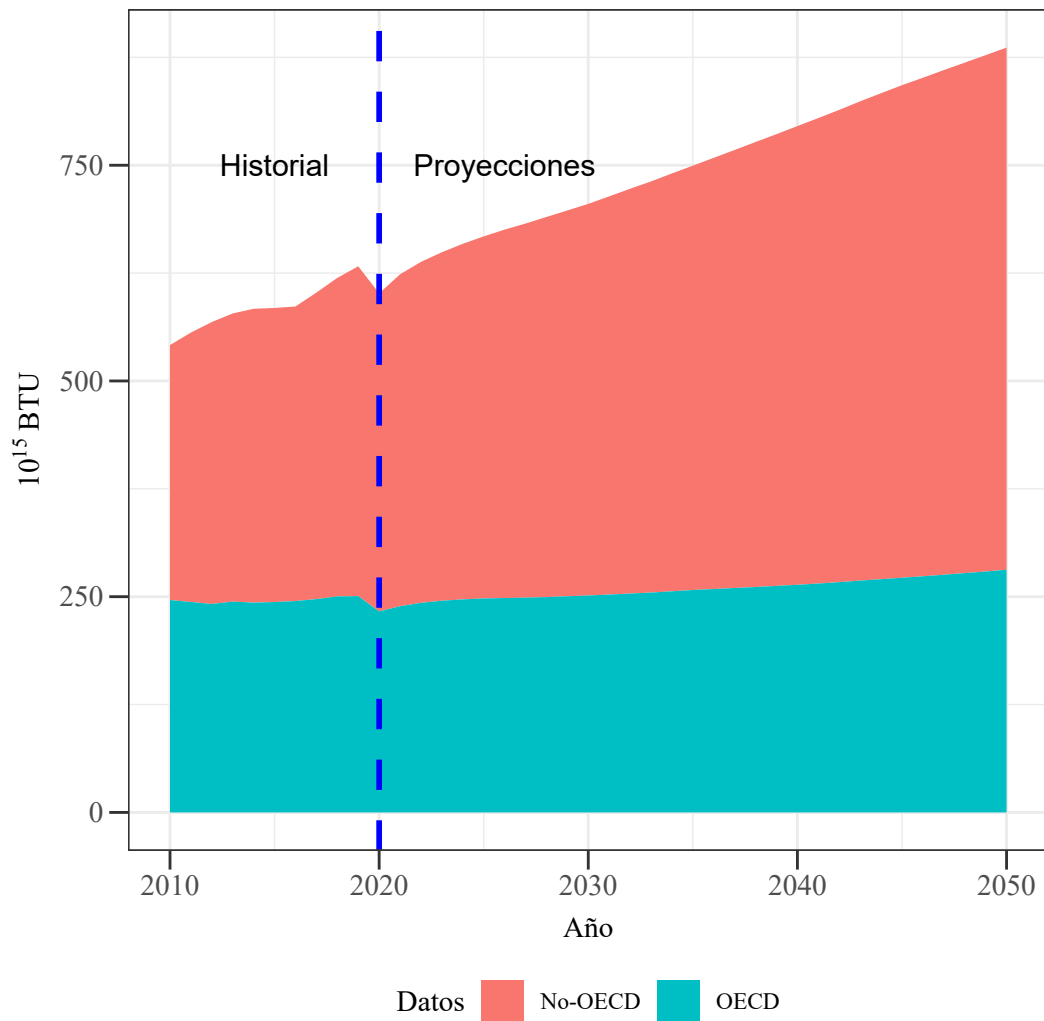


Figura 1.4: Consumo global de energía (datos obtenidos de [13]).

Estas proyecciones estiman que la caída de costos en tecnología y los cambios en políticas gubernamentales impulsan el incremento del consumo de energías renovables pasando del 15.0 % en 2020 al 27.0 % para 2050.

1.1.1. Combustibles fósiles

Las proyecciones indican que los combustibles líquidos continuaran como la fuente de energía primaria; gran parte del incremento en las proyecciones corresponden al sector de transporte en países no pertenecientes a la OECD.

Se espera que el gas natural continúe como la principal fuente de generación de energía eléctrica, debido al relativo bajo costo de inversión y a la eficiencia energética asociada

con el uso de turbinas de gas de ciclo combinado. Respecto al empleo de carbón en las proyecciones mostradas en la Figura 1.1, se espera un incremento en su uso debido a que países asiáticos aun cuentan con grandes reservas de carbón.

1.2. El hidrógeno como un vector energético

En la actualidad las redes eléctricas tienen una tendencia hacia la producción de energía distribuida por medio de la implementación de fuentes de energía renovable. Se puede mencionar que entre estas fuentes se encuentra el hidrógeno, que ha probado ser un vector de energía técnicamente viable y benigno para aplicaciones que van desde la pequeña escala como lo es el suministro de energía fuera de la red eléctrica o aplicaciones a gran escala como lo son las exportaciones de energía [16].

En virtud de que el hidrógeno no se puede encontrar de manera pura en la naturaleza, es necesario separarlo de otros elementos por medio de procesos industriales. Los elementos con los que el hidrógeno está ligado de manera más abundante son el carbono y el oxígeno. Los procesos de producción de hidrógeno más maduros a nivel industrial son lo que desligan el hidrógeno del carbono siendo la gasificación y el reformado de combustibles fósiles, debido a que el costo por kg de hidrógeno producido es barato. El inconveniente de estas tecnologías son sus altas emisiones contaminantes. En la Tabla 1.1 se muestra un resumen de la relación de contaminantes generados por kg de hidrógeno producido.

Tabla 1.1: Dióxido de carbono generado (datos obtenidos de [17]).

Método de producción	Dióxido de carbono generado (kg)
Gasificación de carbón	21.7
Reformado con vapor de gas natural	9.0
Secuestro de carbono	5.2
Electrólisis-generador eólico	1.0

En la Tabla 1.1 se puede observar que el sistema que genera menor huella de carbono por kg de hidrógeno es el proceso de la electrólisis del agua con energía eólica como fuente de alimentación. La energía eólica es la fuente de energía renovable mas importante para cumplir con los compromisos de París para 2050, debido a que actualmente es la fuente de energía verde que mas electricidad produce, con 540.0 GW instalados en 2017 [17].

La mayor desventaja de sistemas de energías sustentables como lo son la solar o la eólica, es su dependencia del clima y de las condiciones geográficas donde están instalados, por este motivo la generación resulta ser de manera intermitente, lo que obliga a tener un sistema de almacenamiento que acumule energía cuando el generador está en funcionamiento y la carga lo permita, que entre en operación suministrando esta energía acumulada en el momento que el generador presente una disminución de producción. Por este motivo, el sistema de electrólisis para generar hidrógeno resulta tener un gran potencial como un contenedor multifuncional.

1.2.1. Métodos de almacenamiento de energía

De manera general, los métodos de almacenamiento de energía se pueden agrupar en cuatro categorías las cuales son: químico, térmico, mecánico y eléctrico, la Tabla 1.2 muestra las principales formas de almacenamiento de energía química y mecánica.

Tabla 1.2: Costos de almacenamiento de energía (datos obtenidos de [17]).

Almacenamiento	Costo/ kWh
Capacitores electroquímicos	8800 €
Compresión	8.8 €
Flywheels	4400 €
Almacenamiento por bombeo	0.9 €

La Tabla 1.3 muestra el costo promedio por kilo Watt-hora almacenado de los principales tipos de baterías incluyendo la pila de hidrógeno.

Tabla 1.3: Comparativo costo de baterías (datos obtenidos de [17]).

Almacenamiento	Costo/ kWh
Batería Zinc	8.8 €
Batería ion-Litio	528 €
Hidrógeno	44-916 €

Como se observa en los cuadros anteriores, la manera más económica de almacenar energía es por medio de almacenamiento por bombeo hidráulico, sin embargo esta

tecnología de almacenamiento solo es posible cuando se tiene un sistema de represas, esto no es posible en todos los lugares donde se genera energía renovable por lo que el acoplamiento de estos sistemas con la tecnología de hidrógeno pueden llegar a ser rentables si se considera su bajo impacto en la huella de carbono [17].

1.3. Economía del hidrógeno

La economía del hidrógeno es una visión a largo plazo que implica producir hidrógeno de manera competitiva con la finalidad de utilizarlo como fuente de energía. La economía significa comercio, por lo tanto, la economía del hidrógeno se refiere a los costos de producir, almacenar y transportar el hidrógeno hasta su usuario final [18]. Las preguntas fundamentales que se aborda al momento de hablar acerca de la economía del hidrógeno son: ¿cómo producir hidrógeno? y ¿donde producir hidrógeno?. Para responder estas preguntas se debe de tomar en cuenta las dos distintas vías de producción de hidrógeno: producción centralizada y descentralizada. La producción centralizada implica el producir a gran escala hidrógeno para después transportarlo hasta estaciones de servicio. Por otra parte, la producción descentralizada se basa en la producción y almacenaje *in situ* [19]. Estas dos vías de producción se pueden observar en la Figura 1.5.

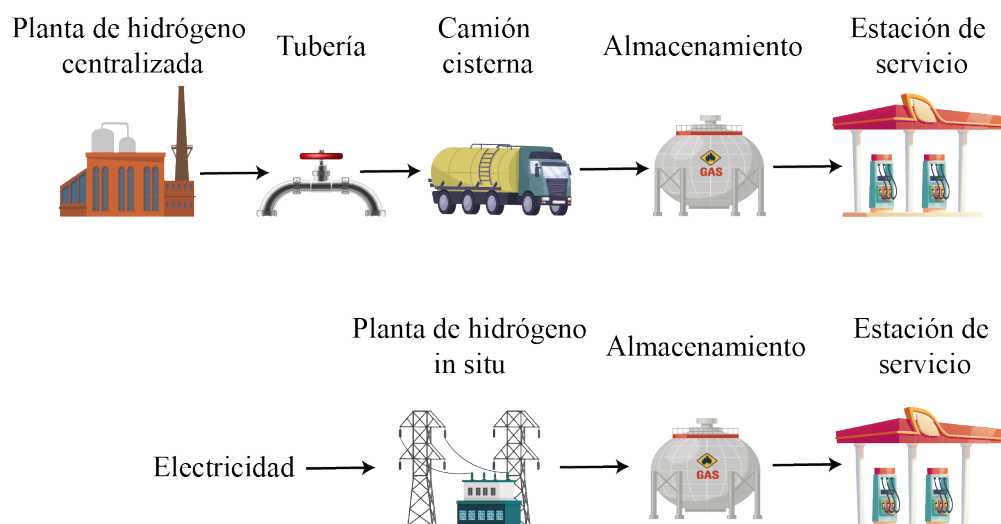


Figura 1.5: Producción centralizada vs producción descentralizada (figura adaptada de [19]).

Los métodos de producción centralizada se caracterizan por ser métodos a gran escala que requieren instalaciones con amplias extensiones, como lo son: el reformado con

vapor del metano, la gasificación del carbón, centrales térmicas solares o la electrólisis a base de energía nuclear. Por otra parte, la producción descentralizada tiene la ventaja de utilizar instalaciones más pequeñas y por ende se tiene la flexibilidad de colocarlas en distintas partes de la ciudad. Por consecuencia, la producción descentralizada puede reducir los costos por transporte y almacenaje. El método más frecuente en la generación de hidrógeno en plantas descentralizadas es la electrólisis del agua.

1.3.1. Costos de producción del hidrógeno

Uno de los aspectos primordiales cuando se habla de la economía del hidrógeno son sus costos de producción por kilogramo producido de hidrógeno, en la Tabla 1.4 se muestra los costos de producción de algunos métodos de generación de hidrógeno en términos de dolares por kilogramo $\$/\text{kg}$ [19].

Método	Costo $\$/\text{kg}$
Reformado del metano con vapor	1.43
Gasificación del carbón	0.81
Electrólisis	2.33-12.43
Termoquímico usando centrales térmicas solares	2.12
Termoquímico usando una central nuclear	1.50
Oxidación parcial del metano	1.73

Tabla 1.4: Costos de producción del hidrógeno (datos obtenidos de [19]).

Se puede observar en la Tabla 1.4 que los métodos de producción a base de combustibles fósiles son los sistemas de generación de hidrógeno más baratos, en cuanto a la electrólisis su costo depende de la fuente de alimentación. El más barato contempla el uso de energía eléctrica generada por la quema del carbón, mientras que el más costoso implica generadores sustentables como lo son las celdas eléctricas.

1.3.2. Almacenamiento y transporte del hidrógeno

Otra de las vertientes de la economía del hidrógeno radica en su transporte y almacenamiento, en comparación con otros combustibles el hidrógeno tiene la desventaja de tener baja densidad volumétrica, por lo tanto, su transporte y almacenamiento son más costosos en comparación a los distintos combustibles que son utilizados en la actualidad. En la Tabla 1.5 se compara la densidad energética por unidad de masa y por unidad de volumen del hidrógeno con distintos tipos de combustibles.

Combustible	LHV (MJ/L)	LHV (MJ/kg)	CO ₂ (g/MJ)
Gasolina	32.2	43.2	73.3
Diésel	36.0	43.1	73.3
Propano en estado liquido, 20 °C	23.4	46.4	64.7
Etanol	21.2	26.8	71.3
Biodiésel	32.8	36.8	76.1
Combustible liquido a base de carbón	34.3	44.0	70.8
Éter dimetílico liquido	19.0	28.4	67.2
Metanol	15.8	19.9	68.9
Hidrógeno 1 bar, 0 °C	0.0108	120	0

Tabla 1.5: Hidrógeno vs combustibles fósiles (datos obtenidos de [20]).

El almacenaje es uno de los retos a vencer en la economía del hidrógeno, de manera general este gas se puede almacenar por medio de la compresión o la licuefacción, sin embargo, típicamente se requiere entre el 10 y el 30 % de LHV para realizar estos procesos [20]. Por este motivo el almacenamiento y transporte del hidrógeno es caro. Por otra parte cuando se añade el costo ambiental a la producción de energía a través de combustibles fósiles y se compara con la producción de energía mediante el hidrógeno, se puede concluir que la economía del hidrógeno es la opción más económica.

1.4. El hidrógeno a través de la historia

La historia de la electrólisis inicia el año 1800 de las manos de William Nicholson y Anthony Carlisle, quienes tratando de comprobar el experimento publicado por Alessandro Volta relacionado con la construcción de la primera pila eléctrica. Ellos observaron que al colocar los electrodos en un recipiente de agua aparecía hidrógeno y oxígeno en cada uno de los electrodos, llegando a la conclusión que éstos eran el resultado de la descomposición de las moléculas del agua. A este proceso le denominaron electrólisis el cual formalmente se define como: “un proceso químico por medio del cual una sustancia o un cuerpo inmersos en una disolución se descomponen por la acción de una corriente eléctrica continua”.

A partir de este acontecimiento, comenzó un gran interés en la electrólisis en diferentes ramos de la ciencia, teniendo mayor importancia en química, donde el químico Humphrey Davy desde 1807-1810 mediante sus investigaciones sobre la electrólisis logró la separación de: magnesio, bario, estroncio, calcio, sodio, potasio y el boro [21].

Más tarde en 1834 su aprendiz Michael Faraday estableció las leyes de la electrólisis las cuales son utilizadas como referencia.

1.5. Tecnologías actuales de separación de hidrógeno

Las tecnologías industriales de producción de hidrógeno se pueden clasificar con base en dos procesos; a base de combustibles fósiles y a base de energías renovables. En el rubro de energías renovables se identifica el método de electrólisis. Este método se basa en la disociación de la molécula del agua como se muestra en la Figura 1.6 [22]. Asimismo, la electrólisis se clasifica en tres métodos: electrólisis alcalina, electrólisis de óxido sólido y electrólisis por membrana sólida polimérica. Esta investigación hace énfasis en la electrólisis alcalina debido a que la electrólisis es la que tiene más facilidades para producir hidrógeno y oxígeno a nivel experimental.

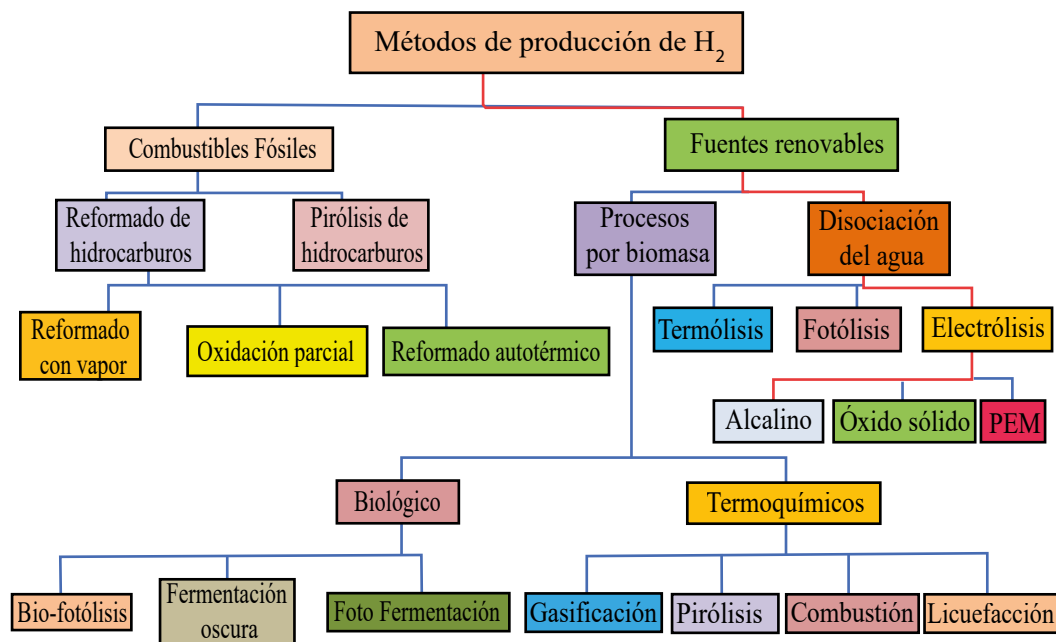


Figura 1.6: Métodos de producción de hidrógeno (Figura adaptada de [22]).

1.5.1. Investigación en la actualidad

En la actualidad existen varios artículos de investigación relacionados con la producción de hidrógeno por medio de la electrólisis; algunos se enfocan en la investigación de distintos tipos de materiales como electrodos, otros investigan el efecto de diferentes tipos de ondas de señal de voltaje en la producción de hidrógeno, y las diferencias

de producción de hidrógeno utilizando distintos tipos de electrolito o modificando unicamente la concentraciones molares. En la Tabla 1.6 se muestra un resumen de artículos de investigaciones importantes que son utilizados como referencia para la presente investigación.

Tabla 1.6: Investigaciones relevantes sobre la electrólisis

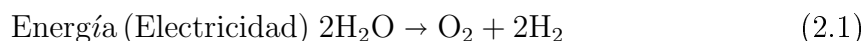
Fuente revisada	Enfoque de estudio	Sistema	Resultados
Effect of operating parameters on hydrogen production by electrolysis of water [23]	Materiales de cátodo y concentración de electrolito	AWE, electrolito: NaOH, Concentración: variable, ánodo: níquel, cátodo:aleaciones de Zinc,Voltaje:fijo variable	Usando Aleación zinc (95 %)- cromo(5 %), concentración: 20.0 g/L, voltaje: 5.0 V y corriente: 0.45 A. Se llega a una producción de 0.03896
A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short power supply [24]	Parámetros eléctricos (voltaje pulsado)	AWE, electrolito: KOH, Concentracion: 16.5 g/l, electrodos:Platino,Voltaje:Pulsado a distinto voltaje pico y frecuencia orden kHz	Resultado positivo ante la hipótesis de que se puede lograr producción de hidrógeno usando una fuente de alimentación por pulsos ultra cortos de voltaje.
Economicalhydrogen production by electrolysis using nano pulsed DC [25]	Parámetros eléctricos (voltaje pulsado), concentración de electrolito	AWE, electrolito: NaOH, Concentracion: variable, electrodos:acero inoxidable,Voltaje:Pulsado a distinto voltaje pico y frecuencia fija de 100.0 MHz	Mientras que para producir 0.58 mL/s con voltaje constante se necesitan 18 W con el método de voltaje de pulso ultra corto solo es necesario 0.57 W.
Experimental Study of wave shape and Frequency of the power supply on the Energy Efficiency of Hydrogen Production by water Electrolysis [26]	Parámetros eléctricos (tipo de señal de onda)	AWE, electrolito: NaOH, Concentracion: sin datos, electrodos:acero inoxidable,Voltaje:Pulsado con distintas formas de onda y voltaje pico y frecuencia del orden MHz	Tanto la eficiencia termodinámica como la de Faraday, mejoran con respecto al voltaje con una onda cuadrada con un rango de frecuencia de 40.0-50.0 Hz.
A systematic study on electrolytic production of hydrogen gas by using graphite as electrode [27]	Material de electrodos	AWE, electrolito: KOH, Concentracion, electrodos y voltaje:variables	Bajo las condiciones 12.0 V y 1.2 A, la producción de hidrógeno es más optima con los electrodos de grafito.
Hydrogen and oxygen generation with polymer electrolyte membrane (PEM)-based electrolytic technology [28]	Membrana electrolito	PEM, electrolito: Nafion 112, catodo:pt/C, anodo: variable, voltaje:variable	La configuración de 14-cell stack genera alrededor de 11.0 L/min de hidrógeno y 5.5 L/min de oxígeno con una eficiencia inicial cerca de 85 % con 1.0 A/cm ² .
Non-Precious Electrodes for Practical Alkaline Water Electrolysis [29]	Parámetros eléctricos y material de electrodos	AWE, electrolito: KOH, concentración: 6.0 M, electrodos:variables, voltaje 1.7 v, temperatura variable	Aleación de níquel con cobre y cobalto como ánodo, mejora la reacción en comparación de níquel puro.

Capítulo 2

Fundamentos de la electrólisis del agua

2.1. Fundamentos químicos

El proceso de la electrólisis se lleva a cabo mediante la ruptura de la molécula de agua por la acción de pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en agua. La Ecuación 2.1 describe el proceso que ocurre durante la electrólisis.



La electricidad aplicada produce una reacción en el cátodo (electrodo negativo), generando una carga negativa. Las cargas crean una gran presión eléctrica que ocasiona que los electrones presentes en el agua se dirijan hacia el extremo del cátodo. Debido a que el agua no es un buen conductor eléctrico, el flujo de corriente eléctrica a través de todo el circuito debe cerrarse, lo cual se logra por medio de las moléculas de agua que se encuentran cerca del cátodo, se rompen y se descomponen en un ion hidrógeno H^+ (átomo de hidrógeno, sin su electrón), y un ion hidróxido OH^- . La reacción que se origina en el cátodo se describe en la Ecuación 2.2.



Era de esperarse que el agua se hubiese dividido en sus componentes elementales, un H y un OH (mismos átomos, pero con carga neutra), pero esto no ocurre porque el átomo de oxígeno atrae con más fuerza el electrón del átomo de hidrógeno (debido a que el átomo de oxígeno es más “electronegativo” que el átomo de hidrógeno). Esto permite que el hidróxido resultante de la ruptura de las moléculas del agua sea más estable. Pero el H^+ , que es un protón, ahora es libre para tomar uno de los electrones

del cátodo (simbolizado por e^-), que está habilitado para transferir esos electrones con mayor fuerza, y se convierte en átomo de hidrógeno neutral, descrito en la Ecuación 2.3.



El átomo neutral de hidrógeno se une con otro átomo de hidrógeno formado de la misma manera que el primero, quedando descrito en la Ecuación 2.4.



Esta molécula generada en forma de gas, asciende hasta la superficie en forma de hidrógeno. La reacción se lleva a cabo en el cátodo, mientras que en el ánodo, que es positivo, ocurre que el ion hidróxido cargado negativamente (OH^-) se traslade a través del depósito hasta el ánodo. Una vez que el ion consigue llegar al ánodo, el ánodo quita el electrón extra que el hidróxido había obtenido anteriormente del átomo de hidrógeno, causando que el ion hidróxido se recombine con otros tres iones hidróxidos para formar una molécula de oxígeno y dos moléculas de agua. Esta reacción se muestra en la Ecuación 2.5:



La molécula de oxígeno generada en forma de gas es muy estable y asciende hasta la superficie de manera similar que el hidrógeno, de esta forma se crea un circuito cerrado, terminando el proceso de producción de hidrógeno[30].

2.1.1. Iones

En química a las entidades idénticas entre sí se les conoce como especie. Los átomos, moléculas, iones y compuestos iónicos son ejemplos de especies. En el caso de las celdas electrolíticas es importante profundizar en las especies conocidas como iones.

Un átomo es una especie con carga neutra; esto se debe a que existe un balance exacto entre los protones de carga positiva que se encuentran en su núcleo y electrones de carga negativa que se encuentran orbitando fuera de él. Entonces, es posible establecer que un átomo es considerado como una entidad neutra debido a que tiene una carga con valor cero.

Se puede producir una entidad cargada llamada ion, considerando un átomo neutro y añadiéndole o sustrayéndole electrones, el resultado entonces sería una entidad con carga neta positiva al que se denomina catión o un ion con carga neta negativa a la que se le denomina anión [31].

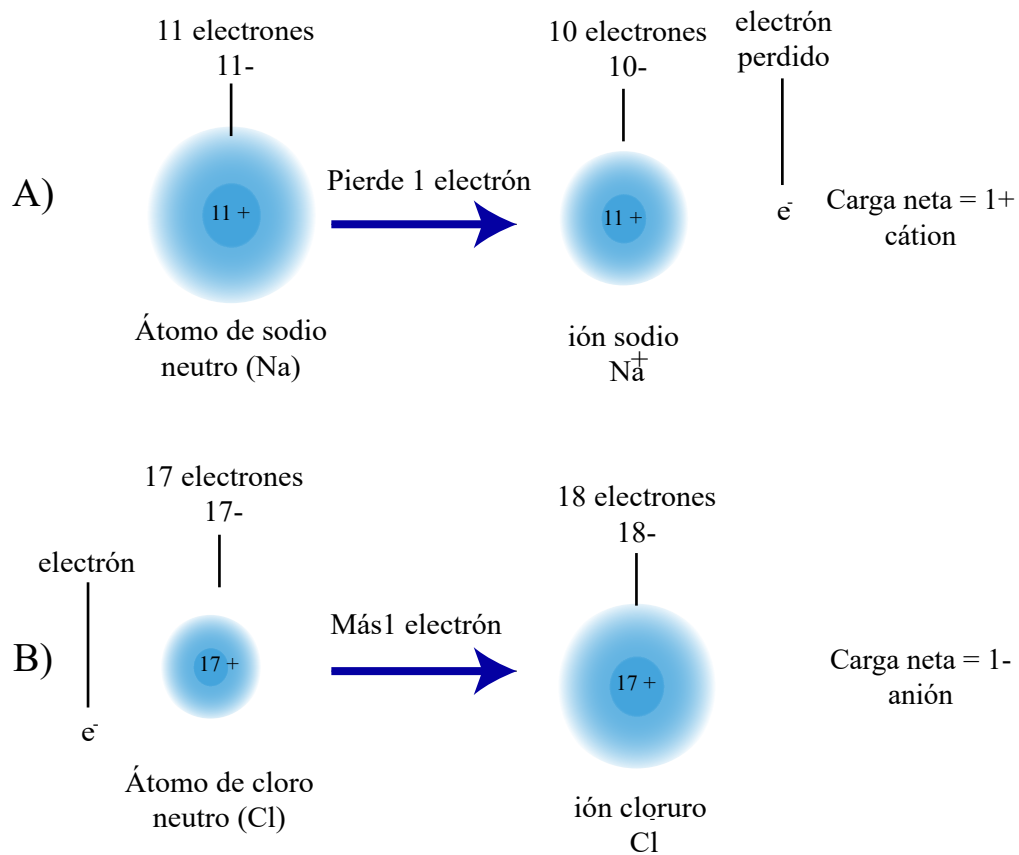


Figura 2.1: Esquema de iones (Figura adaptada de [31]).

La Figura 2.1 muestra un esquema de cómo se forman los iones. En el inciso A se parte del átomo neutro de sodio Na el cual posee 11 electrones, cuando el átomo pierde un electrón este termina con una carga neta positiva Na^+ , llamado catión sodio. Por otra parte en el inciso B se tiene el átomo cloro Cl el cual adquiere un electrón, por lo tanto su carga neta es negativa Cl^- ; a este se le denomina anión cloruro. En el esquema también se puede observar que cuando un átomo adquiere un electrón su tamaño se incrementa, mientras que cuando pierde un electrón su tamaño se reduce.

2.1.2. Compuesto iónico

Cuando una sustancia posee iones se le denomina compuesto iónico, siempre que se forma un compuesto entre un metal y un no metal se puede esperar que éste posea iones [31], estos compuestos iónicos siguen 2 reglas, la primera es que el compuesto iónico debe tener cationes y aniones nunca un solo tipo de ion, y la segunda es que el número de cationes y aniones debe ser tal que su carga neta sea cero. El balance de estos iones se puede observar en la Figura 2.2.

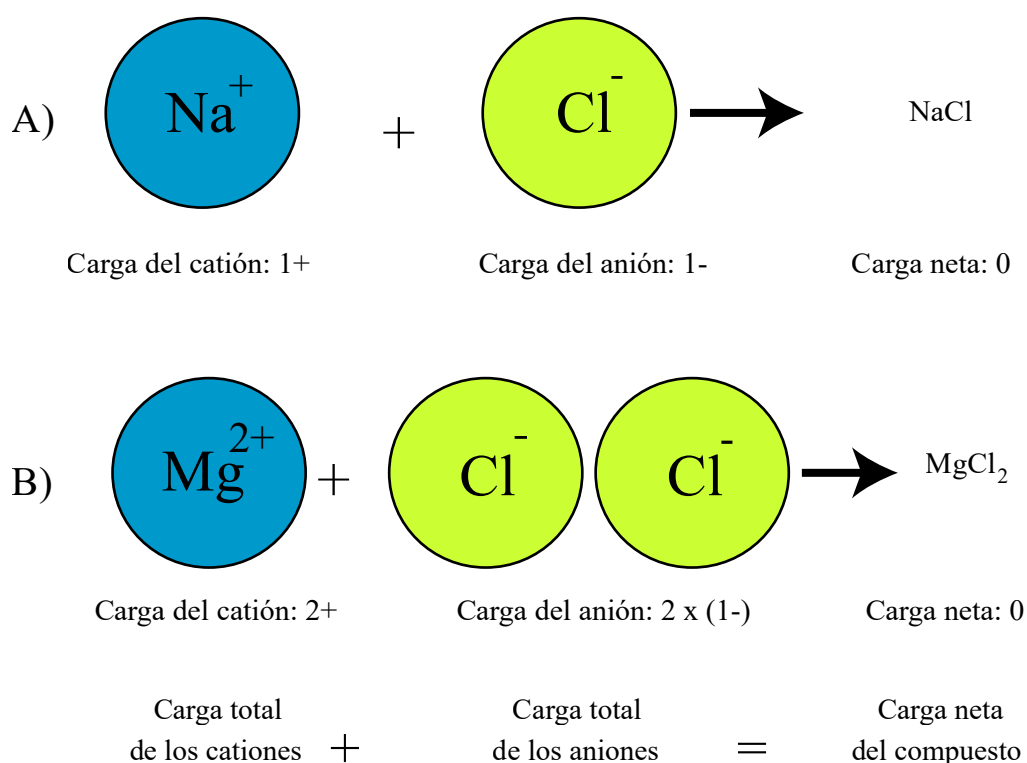


Figura 2.2: Esquema de balance compuesto iónico (Figura adaptada de [31]).

Es importante mencionar que los compuestos iónicos en su forma sólida no conducen electricidad, debido a que sus iones están empaquetados entre sí. Por lo que no tienen libertad de movimiento. En las sustancias iónicas, los iones transportan la corriente solo si son capaces de moverse libremente. Para lograr que los iones puedan moverse libremente existen dos métodos, la fusión y la disolución, la primera consiste en calentar el ion en forma solida hasta que cambie a estado líquido, el otro método es disolverlo en agua, en ambos procesos se logra desorganizar la estructura liberando los iones para que se desplacen libremente.

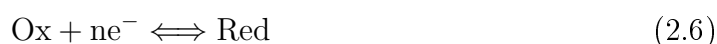
2.1.3. Iones poliatómicos

Un tipo de ion especial son los llamados iones poliatómicos los cuales son entidades con carga conformadas por varios átomos enlazados entre sí. Un ejemplo de estos es el ion hidróxido OH^- , el cual consiste en un átomo de oxígeno y uno de hidrógeno unidos mediante un enlace covalente.

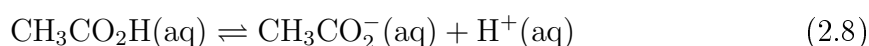
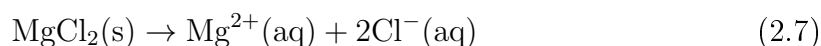
2.1.4. Reacciones oxidación-reducción

En la sección 2.1.2 se mencionó que las reacciones químicas entre los metales y los no metales producen iones, estos iones son producidos por las reacciones de oxidación-reducción, estas reacciones consisten en la transferencia de uno o más electrones del metal al no metal. El proceso de oxidación consiste en la pérdida de electrones. El proceso de reducción aparece cuando existe una ganancia de electrones [31].

La formula general de estas reacciones se muestra en la Ecuación 2.6, a esta ecuación se le conoce como par redox y se entiende como una pareja de especies, en donde una se encuentra en estado reducido (Red) y la otra en estado oxidado (Ox) y por medio de la transferencia de electrones una se transforma en la otra.



Un electrolito es una materia que, cuando se disuelve en agua, produce una disolución que conduce una corriente eléctrica [31]. Pueden ser clasificados en electrolitos fuertes y débiles. Los fuertes son los que por cada unidad de una sustancia que se disuelve en agua produce iones separados, mientras que en los débiles, los iones se encuentran parcialmente disociados. En la Ecuación 2.7 se muestra el electrolito fuerte denominado cloruro de magnesio, mientras que en la Ecuación 2.8 se muestra el electrolito débil ácido acético.



En la Figura 2.3 se muestra cómo se comportan estos electrolitos en disolución, se puede observar que en los electrolitos fuertes estos se disocian por completo, en contraste, en los electrolitos débiles solo se disocia una pequeña fracción de las moléculas.

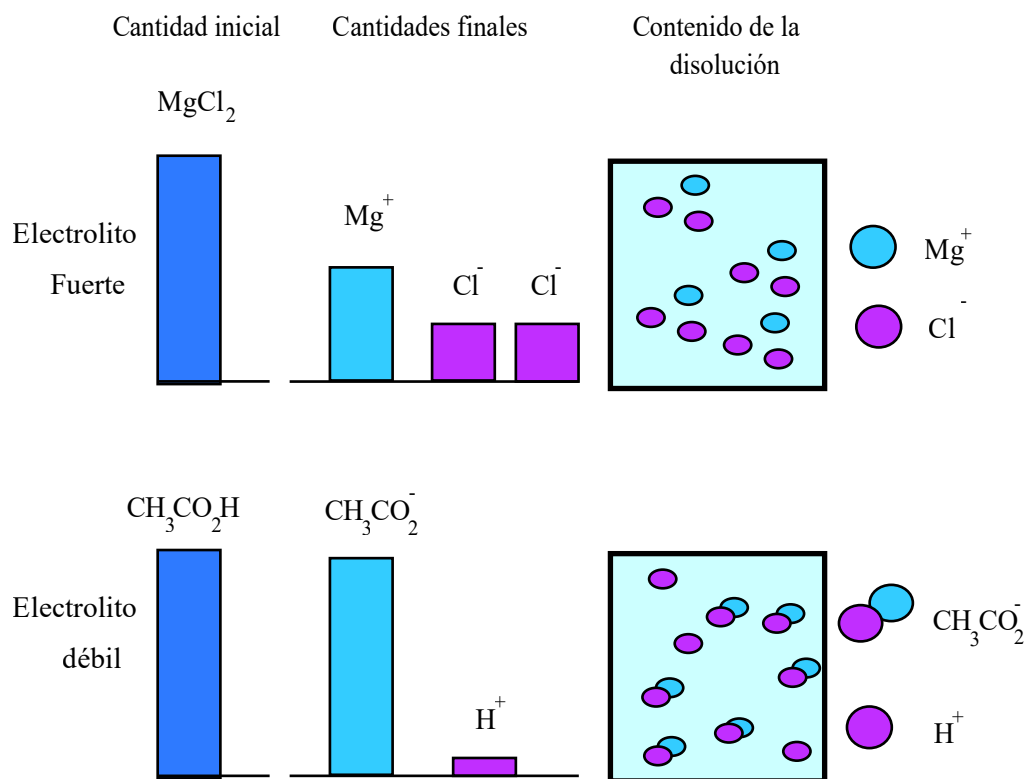


Figura 2.3: Electrolito fuerte y débil (Figura adaptada de [31]).

2.1.5. Electrodos

Partiendo de la definición propuesta por W. Nerst, un electrodo es una combinación de un material electrónicamente conductor y una fase iónica conductora en contacto con este material. Los metales, el grafito y los semiconductores son ejemplos de materiales conductores, mientras que la fase iónica conductora puede ser del tipo solución acuosa, un electrolito polimérico o una sal fundida.

Los electrodos son los componentes más importantes en el proceso de electrólisis. La selección del material para los electrodos deberá cumplir con ciertos requerimientos necesarios, tales como: los electrodos deben ser resistentes a la corrosión, tener buena conductividad eléctrica, una elevada área de superficie, exhibir buenas propiedades catalíticas y mostrar una adecuada integridad estructural, bajo costo y facilidad de disponibilidad, no nocivo para la salud. Además, los electrodos, deben ser inertes a

la solución del electrolito debido a que esto puede ocasionar que el electrolito tenga algún cambio durante el proceso [32].

Diversas tecnologías electroquímicas, incluyen el uso de electrodos con materiales de carbón ordenados con diferentes microestructuras y propiedades, como el grafito, los polvos de carbón activado y los nanotubos de carbono además de fibras de carbón, los cuales se han utilizado durante varias décadas en dispositivos de conversión y almacenamiento de energía [33].

2.1.6. Celdas electrolíticas

Se denomina celda electroquímica o electrolizador al dispositivo en donde ocurren reacciones químicas donde la energía eléctrica se transforma en energía química o viceversa. Una celda electroquímica involucra la transferencia de carga, debido al movimiento de iones en una fase líquida o sólida y el movimiento de electrones en una fase sólida, a través del cual se puede lograr la transformación electroquímica de las especies [34]. En estas celdas se origina un intercambio potencial de electrones entre dos especies químicas, al suministrar energía eléctrica de una fuente externa. Una de las dos especies se oxida, pierde electrones, mientras la otra se reduce ganando los electrones cedidos [31].

La celda electroquímica consta normalmente de dos electrodos que son los materiales que aportan la superficie donde se desarrollarán las reacciones. Según la reacción que ocurre en los electrodos pueden ser de dos tipos, el cátodo que es electrodo donde ocurre la reducción y el ánodo que es el electrodo donde ocurre la oxidación. En la celda, los dos electrodos están conectados por medio de cableado a la fuente de voltaje externa, ambos electrodos están separados una cierta distancia e inmersos en agua para formar una celda electroquímica [34]. Debido a que el agua pura tiene muy baja conductividad, es necesario asegurar un adecuado flujo de los electrones por medio de materiales que sean buenos conductores de la electricidad, para el caso se añade un electrolito al agua (ácido o base, sustancia que permite la conducción eléctrica a través de sus iones en movimiento) para mejorar la conductividad. Al electrodo conectado al polo positivo de la fuente de energía, se le llama ánodo y el electrodo conectado al polo negativo recibe el nombre de cátodo

El suministro de un voltaje mayor a 1.23 volts, ocasionará la separación de las moléculas del agua en iones hidroxilo (OH^-) y en iones hidrógeno (H^+) y debido al campo

eléctrico aplicado comenzará a fluir una corriente eléctrica donde los electrones entrarán por el cátodo de la celda atrayendo a los iones positivos, o cationes (H^+) hacia la superficie del cátodo (reacción de reducción), donde se produce el hidrógeno. Los iones negativos, o aniones (OH^-) serán atraídos y se desplazarán hacia la superficie del ánodo (reacción de oxidación) para producir oxígeno, por donde regresan los electrones a la terminal positiva de la fuente de energía [35].

Existen varios tipos de celdas electroquímicas, y funcionan de formas ligeramente diferentes de acuerdo al tipo de material electrolítico utilizado [36]. El electrolito puede estar hecho de una solución acuosa que contiene iones, una membrana de intercambio de protones (PEM) o una membrana cerámica de intercambio de iones de óxido o de protones en estado sólido.

Los electrolizadores pueden variar en tamaño, desde equipos a pequeña escala, hasta instalaciones de producción central a gran escala que podrían vincularse directamente a formas renovables u otras que no emiten gases de efecto invernadero en la producción de electricidad [32].

En este trabajo se diseñó una celda electrolítica, cuyo esquema general se muestra en la Figura 2.4.

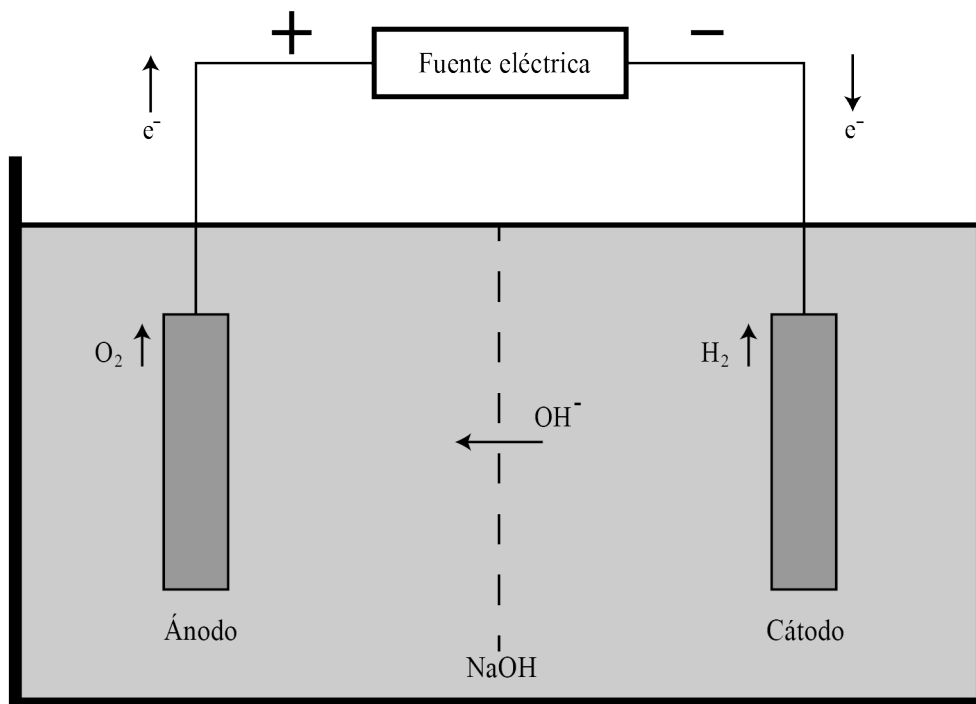


Figura 2.4: Esquema celda electrolítica.

2.1.7. Clasificación de celdas electrolíticas

Las celdas electroquímicas se clasifican en celdas electrolíticas y galvánicas, en las primeras es necesario aplicar un gradiente de potencial o una corriente mediante una fuente de energía externa a la celda para que ocurran reacciones, por otra parte, en las galvánicas las reacciones se llevan a cabo de manera espontánea, debido a la diferencia de potencial existente en las reacciones de cada electrodo.

En las celdas galvánicas, como las baterías o las celdas de combustible, las reacciones o transformaciones químicas se acoplan a reacciones de media celda adecuadas para producir un cambio negativo de energía libre para el proceso general de la celda que luego puede resultar en la producción de energía a través de la generación de electricidad. Las celdas de electrólisis requieren un campo de potencial aplicado que obliga a que se produzcan cambios electroquímicos y químicos no espontáneos en los electrodos. La magnitud del voltaje potencial aplicado generalmente determinará la tasa de transferencia de carga y el flujo iónico [34].

Dentro de las celdas electrolíticas existen esencialmente dos grandes categorías según su temperatura de funcionamiento: los denominados de alta temperatura (700-1000

°C), al trabajar con vapor de agua, y las de baja temperatura (70-80 °C) que emplean agua en estado líquido. Los de esta última categoría, a su vez, se dividen en dos tipos: las celdas electrolíticas de baja temperatura que funcionan en medio ácido y las que lo hacen en medio alcalino (básico) [37].

La tecnología más desarrollada actualmente y con menor costo de inversión es la de los sistemas alcalinos (AEC por sus siglas en inglés, Alkaline Electrolysis Cell), ya que no necesitan metales preciosos como el platino o el iridio, que son imprescindibles para las de medio ácido [37].

En la actualidad existen tres tecnologías principales de celdas electrolíticas: celda de electrólisis alcalina (AEC), electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM por sus siglas en inglés, Proton Exchange Membrane) y celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC por sus siglas en inglés, Solid Oxide Electrolyser Cell). La principal diferencia entre ellos radica en el material empleado como electrolito [37].

2.1.7.1. Celda de electrólisis alcalina (AEC)

La celda de electrólisis alcalina forma parte de una tecnología muy madura y comercial que se presenta como el estándar actual para la electrólisis a gran escala. Se ha utilizado desde la década de 1920. El rango de operación de las celdas electrolíticas alcalinas va desde una carga mínima del 10.0 % hasta la capacidad máxima de diseño [38].

Emplea como electrolito una disolución acuosa de una base fuerte como el NaOH o el KOH. Este tipo de electrolito es adecuado porque presenta una gran conductividad iónica, además, tolera la descomposición química debida al voltaje de operación, por tanto, no afecta a la eficiencia de la electrólisis, y resiste las variaciones de pH que ocasionan los cambios en la concentración protónica sobre los electrodos durante el proceso [39].

La conductividad de la disolución de KOH es máxima cuando la concentración se encuentra alrededor del 28.0 % en peso de KOH, por esta razón las celdas electrolíticas alcalinas trabajan a concentraciones en el intervalo de 25.0–30.0 % en peso [39]. La temperatura habitual de trabajo de la celda de electrólisis alcalina comercial es de 80.0–90.0 °C. Durante el proceso, la concentración del electrolito se mantiene por adición de agua destilada a medida que se necesita, dependiendo de la velocidad de

producción del hidrógeno.

Para impedir el contacto entre el hidrógeno y el oxígeno producidos en el cátodo y en el ánodo, se utiliza un separador (diafragma) poroso que permite el flujo de electrolito. El separador debe tener un tamaño de poro menor al del diámetro de las burbujas de gas más pequeñas ($10 \mu\text{m}$ en el caso de las burbujas de hidrógeno) y debe tener una porosidad superior al 50 %, con la finalidad de conservar la resistencia eléctrica en valores relativamente bajos. Los separadores que se emplean convencionalmente son de materiales poliméricos como el politetrafluoroetileno (PTFE). Las celdas alcalinas permiten obtener una pureza nominal del 99.8 % de hidrógeno. Su eficacia se sitúa alrededor del 62.0 al 82.0 %, siendo mayor cuando se incrementa a el tamaño de la celda [39].

2.1.7.2. Celda de electrolisis alcalina usando electrodo de hidróxido de níquel

Una nueva técnica alternativa en las celdas de electrólisis de agua alcalina es el uso de un electrodo fabricado de hidróxido de níquel. La finalidad del uso del hidróxido de níquel es el separar las reacciones químicas de generación de hidrógeno y oxígeno [40]. Este nuevo método se desarrolló con la finalidad de eliminar los diafragmas porosos que se utilizan en las celdas de electrólisis de agua alcalina. Estos diafragmas tienen la desventaja de ser reemplazados con regularidad debido a que la separación de gases se realiza a alta presión [40]. En la Figura 2.5 se muestra el funcionamiento de este tipo de celdas, se observa que poseen un tercer electrodo de hidróxido de níquel. El funcionamiento de esta configuración consiste en formar un circuito entre los electrodos que generan los gases de hidrógeno (HER) y oxígeno (OER) con el electrodo de hidróxido de níquel. Cuando se cierra el circuito entre el electrodo HER y el hidróxido de níquel, se genera una reducción catódica similar al método convencional generando hidrógeno y simultáneamente se produce una oxidación anódica del hidróxido de níquel Ni(OH)_2 , produciéndose hidróxido de óxido de níquel NiOOH . Por otra parte, al momento de cerrar el circuito entre el electrodo OER y el electrodo de hidróxido de níquel, se produce una oxidación anódica similar al método convencional generando oxígeno y una reducción catódica del NiOOH , produciéndose Ni(OH)_2 .

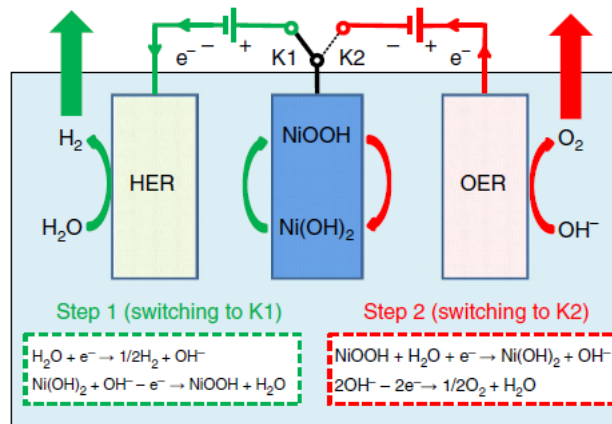


Figura 2.5: Hidróxido de níquel como electrodo (Figura de []).

2.1.7.3. Celdas de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)

El desarrollo de los sistemas de electrolizadores PEM se realizó en la década de 1960 en la compañía General Electric, para mejorar algunos de los inconvenientes operativos de los electrolizadores alcalinos. Como solución de electrolito, estas celdas utilizan agua pura, con lo cual evitan la recuperación y el reciclaje de la solución de electrolito de hidróxido de potasio que es necesaria en los electrolizadores alcalinos. Su tamaño relativamente pequeño, los hace más atractivos debido al poco espacio que ocupan, adaptándose mejor a las áreas urbanas densas que los electrolizadores alcalinos.

Estas celdas pueden producir hidrógeno altamente comprimido para la producción y el almacenamiento descentralizados en las estaciones de servicio (30.0–60.0 bar sin un compresor adicional y hasta 100.0–200.0 bar en algunos sistemas, en comparación con 1.0–30.0 bar para los electrolizadores alcalinos) y ofrecen un funcionamiento flexible, incluida la capacidad de proporcionar reserva de frecuencia y otros servicios de red. Su rango de funcionamiento puede ir desde carga cero hasta el 160 % de la capacidad de diseño (por lo que es posible sobrecargar el electrolizador durante algún tiempo, si la planta y la electrónica de potencia se han diseñado en consecuencia).

Sin embargo, se debe mencionar que se necesitan catalizadores de electrodos costosos (platino, iridio) y materiales de membrana, y que su vida útil es actualmente más corta que la de los electrolizadores alcalinos. Sus costos generales son actualmente más altos que los de los electrolizadores alcalinos, y su implementación es menos extendida [38]. Las eficiencias de estos sistemas pueden alcanzar casi el 100 %, pero

normalmente trabajan en un rango del 80–90 %. Una de las principales ventajas de la tecnología PEM es que puede generar hidrógeno de extremada pureza (>99.9 %) [41].

2.1.7.4. Celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC).

Las SOEC son la tecnología de electrólisis menos desarrollada. El desarrollo de los electrolizadores de óxido sólido empezó a principios de los años 70. Las temperaturas de operación son muy altas, cercanas a los 1000 ° C, aprovechando al máximo el efecto que permiten las altas temperaturas sobre las cinéticas y los parámetros de control termodinámicos de la electrólisis del agua, para generar hidrógeno a partir de vapor de agua [38].

Esta tecnología de celdas de óxido sólido aún no se ha comercializado, se encuentra en estado de desarrollo. Es necesario ocuparse en mejorar los bajos tiempos de vida de los materiales empleados en su construcción, así como en la mezcla de fases adyacentes y otros problemas de ingeniería relacionados con el sellado de gases y el control térmico, para que esta tecnología pueda comercializarse convenientemente [42]. Sin embargo, esta tecnología presenta ventajas únicas que la hacen muy atractiva con respecto a las otras. Comparado con los otros tipos de electrolizadores, el consumo de energía eléctrica es inferior. Si se compara con los electrolizadores alcalinos avanzados, las celdas de óxido sólido requieren al menos un 10 % menos de energía. La eficiencia de la electrólisis a altas temperaturas puede ser prácticamente del 100 % [41].

2.2. Fundamentos de la electrólisis

La electrólisis del agua es un proceso por medio del cual el agua (H_2O) se divide en sus componentes básicos de hidrógeno y oxígeno por medio de la aplicación de corriente eléctrica. En la electrólisis del agua la energía eléctrica es la fuente primordial para realizar las reacciones electroquímicas endotérmicas. Debido a la estabilidad de la molécula del agua, se necesita un consumo elevado de electricidad [36].

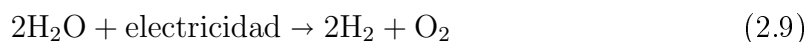
La electricidad necesaria para dividir el hidrógeno y el oxígeno en su fase gaseosa, proviene de una fuente de alimentación de corriente continua (CC). La corriente eléctrica continua, pasa por el electrodo cargado positivamente (ánodo) al electrodo cargado negativamente (cátodo) sumergidos en el agua mezclada con una sustancia

iónica (electrolito) encargada de mejorar la conductividad eléctrica del agua, al reducir la resistencia al paso de la corriente a través del agua [36].

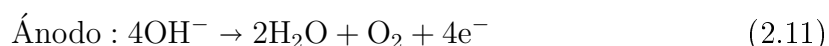
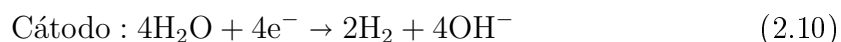
En el proceso de electrólisis, los electrones son capturados o son liberados por los iones en la superficie de los electrodos, provocando la generación de un sistema multifásico gas-líquido-sólido [32]. La semireacción de reducción de H^+ (proceso HER) tiene lugar en el cátodo. Los electrones fluyen hacia este electrodo desde el circuito exterior y lo polarizan negativamente para producir H_2 . La semirreacción de oxidación de O_2 (OER) tiene lugar en el otro electrodo, llamado ánodo. Los electrones salen del ánodo al circuito exterior, polarizándolo positivamente para producir O_2 [43]. Por lo tanto, se genera hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo. En las reacciones electroquímicas es posible el incremento de la velocidad de las reacciones químicas, mejorando la transferencia de electrones entre los electrodos y los reactivos al añadirse catalizadores (electro catalizadores) a las superficies de los electrodos [37].

La electrólisis transforma la energía eléctrica en energía química mediante el almacenamiento de electrones en forma de enlaces químicos estables. La energía química producida se puede utilizar como combustible o se puede convertir de nuevo en electricidad, si esto es requerido [44]. La electrólisis requiere alrededor de 9.0 litros de agua para producir 1.0 kg H_2 [45], produciendo 8.0 kilogramos (kg) de oxígeno como subproducto.

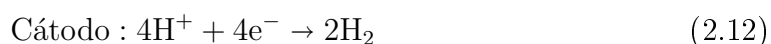
Esta técnica produce energía limpia sin emisión de contaminantes y, por lo tanto, es una clave para cerrar la brecha tecnológica hacia una sociedad con cero emisiones netas de CO_2 . La ecuación básica de la electrólisis del agua se describe como:

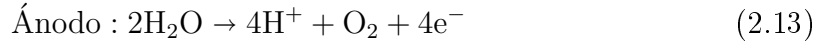


En medio alcalino o neutro tienen lugar las siguientes semi-reacciones:



mientras que en medio ácido se producen las semi-reacciones:





La electrólisis del agua no es un fenómeno espontáneo porque el potencial de reacción global estándar es negativo. Por lo tanto, requiere una intervención externa (fuente de energía). La reacción global se puede escribir como:



2.2.1. Termodinámica de la electrólisis

La relación entre masa disociada y energía eléctrica suministrada se establece mediante las leyes de Faraday de la electrólisis, Ecuación 2.15. El trabajo eléctrico mínimo para la disociación de la molécula del agua se obtiene bajo la consideración de un proceso reversible. Se debe considerar que el trabajo eléctrico es el producto entre la carga eléctrica y el potencial eléctrico. En la Ecuación 2.16 se relaciona la función de Gibbs con el trabajo eléctrico. Por lo tanto, el potencial eléctrico mínimo para la disociación de la molécula del agua puede ser determinado por la Ecuación 2.16.

$$m = \frac{Q * M}{F * z} \quad (2.15)$$

$$\Delta G = Z * F * E_{\text{rev}} \quad (2.16)$$

En condiciones de referencia (298 K y 1 atm) se obtiene el potencial eléctrico mínimo 1.23 V. Donde $Z = 2.0$, F es la constante de Faraday e igual a 96485.0 C/mol y la función de Gibbs en estado líquido es 237.22 kJ/mol. El potencial eléctrico mínimo es usado como referencia para determinar una eficiencia de producción de hidrógeno mediante la Ecuación 2.17. El potencial eléctrico suministrado a la celda electrolítica (E_{Celda}) es registrado en tiempo real, a través del sistema de adquisición de datos. La definición de eficiencia termodinámica indica que ésta disminuye a medida que se incrementa el potencial eléctrico.

$$\eta = \frac{E_{\text{Rev}}}{E_{\text{Celda}}} \quad (2.17)$$

Debido a que la eficiencia termodinámica nos indica producir el hidrógeno con potenciales eléctricos lo más próximos al potencial eléctrico reversible, no es considerada como parámetro de estudio para evaluar el comportamiento de los parámetros eléctricos sobre la producción de hidrógeno. Un parámetro de desempeño que se puede

definir es la energía producida (producto entre el poder calorífico inferior y la masa de hidrógeno) entre la energía eléctrica suministrada, Ecuación 2.18.

$$\beta_{\text{Electrica}} = \frac{\text{LHV} * m_{\text{H}_2}}{E_{\text{celda}} * I * \Delta t * f} \quad (2.18)$$

Otra definición para evaluar la producción de hidrógeno es la eficiencia de Faraday, la cual relaciona hidrógeno producido en el experimento con el máximo teórico que es posible generar como lo muestra la Ecuación 2.19.

$$\eta_{\text{Faraday}} = \frac{V_{\text{H}_2}(\text{Experimental})}{V_{\text{H}_2}(\text{Teórico})} \quad (2.19)$$

La eficiencia de Faraday relaciona el volumen de hidrógeno producido en la celda experimental y el volumen de hidrógeno teórico producido que corresponde al flujo eléctrico durante el tiempo de la prueba. El volumen de la celda electrolítica se mide mediante unos embudos de separación graduados, mientras que el volumen teórico se obtiene mediante la Ecuación 2.20.

$$V_{\text{H}_2}(\text{teórico}) = \frac{I * \Delta t * f * R * T}{2 * F * P} \quad (2.20)$$

Donde I representa la corriente promedio, Δt es el tiempo experimental, R es la constante particular del hidrógeno, T es la temperatura del medio, P es la presión a la que se encuentra el hidrógeno en los tubos de separación, f representa el porcentaje de intermitencia y F la constante de Faraday. El volumen de hidrógeno es dependiente de la temperatura. En el diseño de experimentos se considero que la temperatura es una variable no controlable. Por lo tanto, existen oscilaciones en la eficiencia de Faraday que dificultan la definición de las condiciones eléctricas y de concentración optimas.

2.2.2. Criterio operacional de selección de temperatura

La energía total que es necesaria para descomponer un mol de agua en oxígeno e hidrógeno corresponde al cambio de entalpía (ΔH) de la reacción (Ecuación 2.21).

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (2.21)$$

Donde cada uno de los elementos representan las energías presentes en la electrólisis:

- ΔH : Entalpía de disociación, representa la energía total.
- ΔG : Energía libre de Gibbs, representa la energía eléctrica.

- $T\Delta S$: Energía en forma de calor.

La función libre de Gibbs es representada en su forma diferencial mostrada en la Ecuación 2.22.

$$dG = dH - d(T * S) \quad (2.22)$$

En condiciones estándar de temperatura y presión 298 K, 1.0 bar. Los valores de la entalpía de disociación, energía libre de Gibbs y entropía son los siguientes:

- $\Delta H_d = 285.84 \text{ kJ/mol}$
- $\Delta G_d = 237.22 \text{ kJ/mol}$
- $\Delta S_d = 163.15 \text{ kJ/mol}$

Como se puede observar en la Figura 2.6 la función de Gibbs depende de la temperatura en la celda. A medida que aumenta la temperatura, la energía eléctrica necesaria para la electrólisis, disminuye. A temperatura ambiente, alrededor del 85 % del total de la energía proviene de la energía eléctrica y el restante 15 % proviene del calor [46].

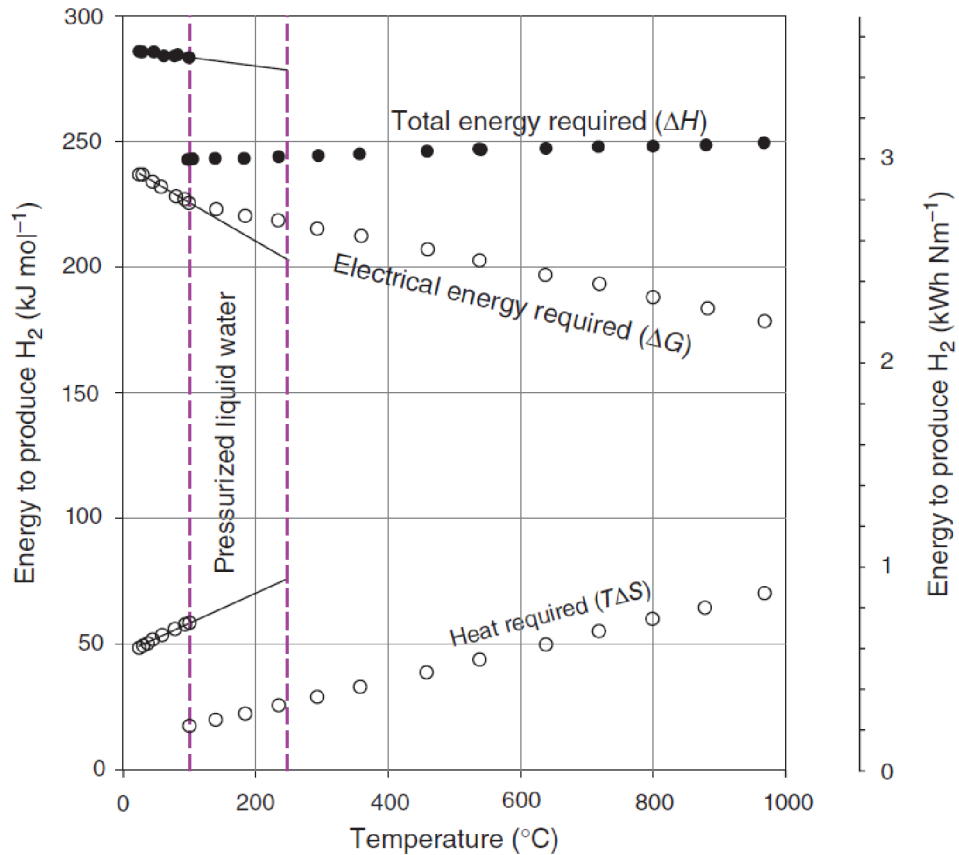


Figura 2.6: $\Delta G(T)$, $\Delta H(T)$ y $T\Delta S(T)$ de la reacción de disociación del agua. (Figura de[45]).

En las celdas de electrólisis de agua se pueden diferenciar dos tipos de voltaje calculados a temperatura y presión estándar; el voltaje de equilibrio (Ecuación 2.23) y el voltaje de entalpía o termo neutral (Ecuación 2.24).

$$E(T, P) = \frac{\Delta G_d(T, P)}{n * F} = 1,23 \text{ V} \quad (2.23)$$

$$V(T, P) = \frac{\Delta H_d(T, P)}{n * F} = 1,48 \text{ V} \quad (2.24)$$

Donde: n representa número de electrones intercambiados durante el proceso de electrólisis el cual es igual a 2.0 y F se refiere a la constante de Faraday con valor de 96485 C/mol.

Capítulo 3

Caracterización experimental de la celda electrolítica

3.1. Modelo experimental

El modelo experimental (Figura 3.1) utilizado considera una cuba contenedora del electrolito, de 350.0 mm de largo, 200.0 mm de ancho y 330.0 mm de profundidad. Las paredes se fabricaron con vidrio de 5.0 mm de espesor y se reforzó con marcos hechos de aluminio en la parte inferior y superior de la cuba.

Dentro del recipiente se colocó un sistema de sujeción en acrílico de 9.0 mm de espesor para fijar y separar los electrodos, en el sistema de sujeción se montan los electrodos, estos fueron colocados con una separación de 125.0 mm entre centros. Los electrodos fueron conectados a las terminales positiva y negativa de la fuente de corriente directa y en las juntas se colocó tubo termo-contráctil para evitar que el cobre reaccionara al estar en contacto con el electrolito.

Para la captación gases hidrógeno y oxígeno se montaron embudos de plástico de manera concéntrica a los electrodos y separados a 20.0 mm por encima. Estos embudos se acoplaron con una manguera a embudos de separación cilíndricos. El sistema descrito sirve para confinar el gas producido por los electrodos y posteriormente medir adecuadamente su volumen. Los recipientes de medición tienen una graduación que satisface la especificación ASTM E-1096.

La capacidad de estos embudos son de 250.0 mL para el hidrógeno y 125.0 mL para el oxígeno, la separación de graduación es 5.0 mL y de 1.0 mL respectivamente.

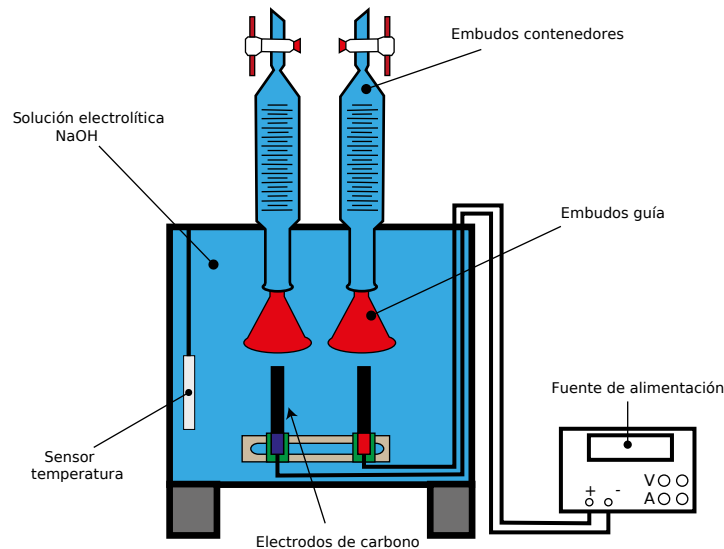


Figura 3.1: Modelo experimental.

3.2. Medición de los gases

Dentro de los principales factores que afectan la medición del material volumétrico se identifica la temperatura ambiental y la del fluido a medir, la limpieza y calidad del material volumétrico, el enrase y el ajuste del menisco.

La calidad del instrumento de medición se garantiza mediante la norma ASTM 1096, mientras que el factor de limpieza se controló sumergiendo los embudos de separación en una solución de ácido nítrico (HNO_3) al 5.0 % durante 10 minutos para después enjuagar con agua destilada. Este procedimiento de limpieza se realiza antes de comenzar el experimento.

En relación al proceso de enrase, se emplea un procedimiento en el cual se calibra el volumen con base en un nivel previamente definido, considerando coincidir con la tangente de la curva formada en el límite liquido-gas; el cual se le denomina menisco.

3.2.1. Ajuste del menisco

Para realizar el procedimiento de enrase de volumen es muy importante que el instrumento volumétrico se encuentre en posición vertical y que la persona que realiza la medición se coloque convenientemente para asegurar la confiabilidad del proceso; para lograrlo, es importante que al revisar el nivel correspondiente, su mirada se encuentre a la misma altura del menisco. Es importante mencionar que el menisco se puede presentar en dos formas: convexo y cóncavo.

En la Figura 3.2 se muestra la forma correcta de medir cada uno de estos meniscos. En el menisco convexo la lectura se realiza a la altura del punto más alto en el centro de la superficie del líquido, mientras que el cóncavo se registró tomando como referencia el punto más bajo.

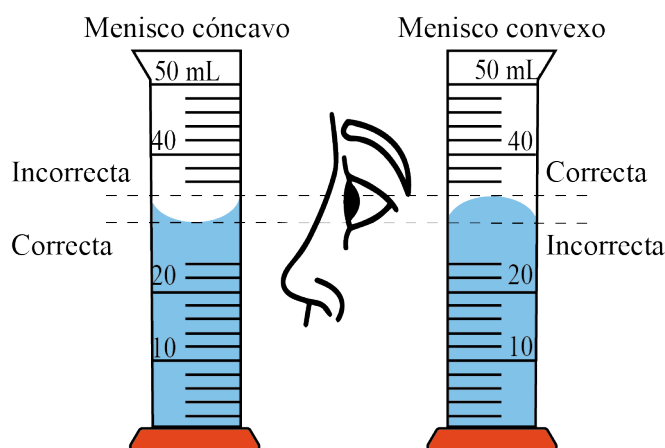


Figura 3.2: Postura correcta para la medición del menisco.

La curvatura del menisco está relacionada con la tensión superficial del líquido a medir. El menisco convexo se presenta en líquidos no humectantes; por otra parte el cóncavo se presenta en soluciones acuosas. En nuestro experimento el menisco formado en los embudos de separación cilíndricos es cóncavo.

Para asegurar que el menisco conserve su calibración se fijaron los embudos de separación con ayuda de un arreglo de pinzas y soporte universal. La orientación de los embudos es de forma vertical. La estabilidad de los embudos separadores se consigue con la ayuda de un sellador de mastique, es maleable y se endurece al secar. Este montaje se muestra en la Figura 3.3.

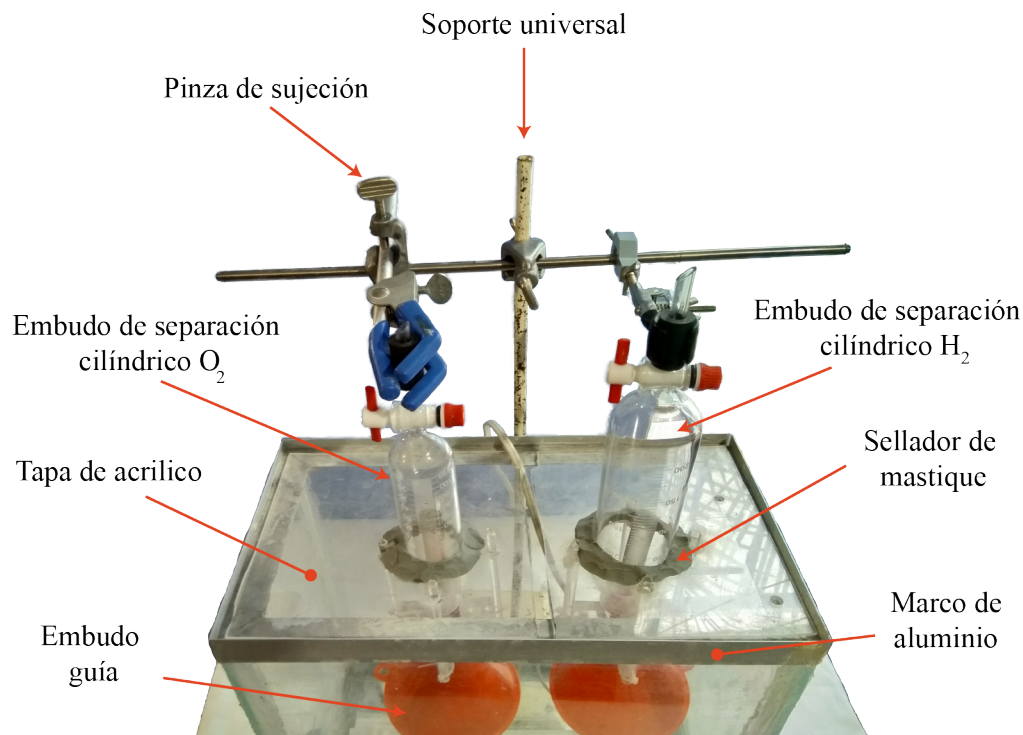


Figura 3.3: Montaje físico de embudos.

3.3. Procedimiento experimental

El experimento consistió en producir 30.0 mL de hidrógeno, a la celda de electrólisis se le suministró voltajes de 6.0, 9.0, 12.0 y 15.0 V. El voltaje suministrado fue con dos tipos de señales de onda: voltaje constante y voltaje frecuenciado. El voltaje constante consistió en encender la fuente de alimentación y mantener el voltaje constante durante todo el experimento, mientras que la señal de voltaje frecuenciado fue suministrada de forma de onda rectangular con los mismos tiempo de encendido y apagado de onda. Las variables que se midieron fueron el flujo volumétrico de hidrógeno, la corriente y el voltaje de la celda, en las siguientes secciones se menciona como se realizó la medición de estas variables.

3.3.1. Flujo volumétrico de hidrógeno

El experimento comienza encendiendo la fuente de alimentación dejando acumular el gas de hidrógeno por aproximadamente 10.0 minutos, esto para garantizar que el experimento llegue a la estabilidad requerida; después de este tiempo y que el menisco toque la primera marca, se empieza a cronometrar, y se toman los tiempos en los que el menisco toco las siguientes 6.0 marcas, obteniendo el tiempo experimental para

producir un volumen de 30.0 mL de hidrógeno. La Ecuación 3.1 describe el flujo volumétrico.

$$\dot{V} = \frac{V}{t_{exp}} \quad (3.1)$$

3.3.2. Voltaje y corriente de la celda

Para la medición de voltaje y corriente se utilizaron los sensores divisor de voltaje y resistencia Shunt. Los valores sensados fueron recopilados por la tarjeta de adquisición de datos DAQ de la marca National Instruments y procesados en el software Labview. Finalizando el procesamiento de datos se exportan en una hoja de Excel, la cual se importa al software Matlab, donde por medio del método de integración numérico, se evaluó la corriente y voltaje promedio del experimento.

3.3.3. Temperatura ambiental y temperatura de la celda

Para estas variables se utilizaron los sensores digitales DTH11 para la temperatura ambiental y el sensor DS18B20 para el electrolito, estos sensores por ser digitales no los proceso directamente la tarjeta de adquisición de datos debido que esta tarjeta es para señales analógicas. Para procesar los datos se utilizó la tarjeta de desarrollo Arduino Mega, una vez procesados los datos se envían por protocolo serial al software Labview y se realiza el mismo procedimiento en el software Matlab para conocer las temperaturas promedio.

3.4. Elementos de la celda de electrólisis

3.4.1. Electrodo

En la selección de los electrodos se consideraron ventajas económicas y químicas, las cuales están documentadas en la investigación [27]; se utilizaron barras de grafito en ambos electrodos, cuyas dimensiones son de 10 mm de diámetro x 100 mm de longitud. Los electrodos pueden ser fácilmente adquiridos en el mercado con purezas del 99.9 % y son muy adecuadas para la experimentación, Figura 3.4.



Figura 3.4: Electrodo de grafito.

La Tabla 3.1 muestra las principales características de los electrodos de grafito.

Tabla 3.1: Propiedades de los electrodos de grafito.

Propiedad	Unidad	Valor
Pureza	%	99.9
Densidad	g/cm^3	1.65
Resistividad	$Ohm * m$	$9,0 * 10^{-6}$
Coefficiente de expansión térmica	$1/C$	$2,5 * 10^{-6}$
Conductividad térmica	$W/m*K$	130

3.4.2. Electrolito

El electrolito es del tipo alcalino, hidróxido de sodio NaOH con norma USP de grado farmacéutico con una pureza del 95-100 %. La solución electrolítica para nuestros experimentos es una mezcla de 22.0 L de agua destilada y la sal NaOH a distintas concentraciones. La concentración del electrolito es la variable que se regula y está relacionada con la conductividad eléctrica.

La Ecuación 3.2 muestra la cantidad de gramos (g) necesarios para preparar muestras de solución de hidróxido de sodio a distinta concentración molar (α) para un volumen (V) considerando el peso molecular (M) del hidróxido de sodio .

$$g = M * \alpha * V \tag{3.2}$$

La relación de la conductividad eléctrica de la solución con respecto a concentración es necesaria para la experimentación. Se realizaron 7 para cada concentración para conocer la relación de la conductividad eléctrica y la molaridad.

Para preparar estas muestras se utilizó una probeta graduada de 100.0 mL con la que se midió agua destilada, mientras que el hidróxido de sodio se peso mediante una balanza analítica de la marca Ohaus Explorer modelo E0214 (Figura 3.5). Esta balanza tiene una capacidad de pesar hasta 220.0 g y tiene una precisión de 0.0001 g.



Figura 3.5: Balanza analítica.

El agua destilada y el hidróxido de sodio se vertieron dentro de un vaso de precipitado y se mezclaron con ayuda de un agitador magnético durante 5.0 minutos, después se procedió a medir la conductividad con el conductímetro Thermo Scientific Orion Star (Figura 3.6).



Figura 3.6: Conductímetro.

La Tabla 3.2. muestra la relación de la concentración, los gramos de NaOH y la conductividad del electrolito.

Tabla 3.2: Concentraciones del electrolito.

Concentración (Mol/L)	Gramos de NaOH (g)	Conductividad promedio ($\mu S/cm$)
0.000	0.000	2.7
0.125	0.500	27.1
0.250	1.000	56.0
0.375	1.500	75.0
0.500	2.000	100.3
0.625	2.500	120.3
0.750	3.000	139.3
0.875	3.500	156.1

La influencia de la concentración del electrolito se genera a través de la relación que existe entre la conductividad eléctrica y la concentración del electrolito. Los resultados se muestran en la Figura 3.7, indicando que existe una relación prácticamente lineal entre ambas variables.

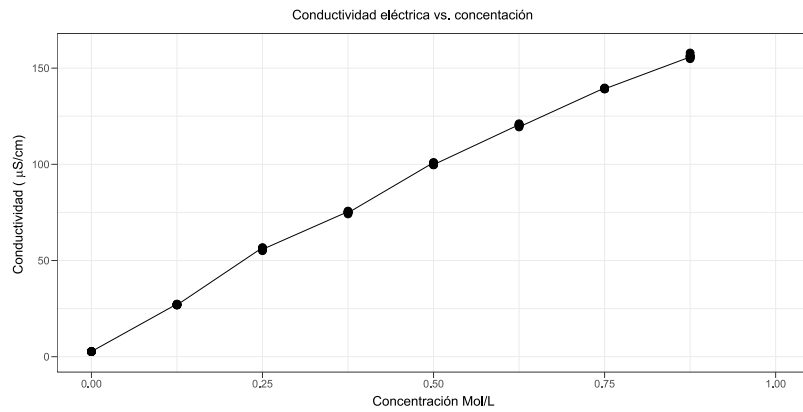


Figura 3.7: Conductividad promedio.

3.4.3. Sistema eléctrico

El experimento se dividió en dos fases, la experimentación con voltaje no frecuenciado al cual nos referimos a ella como constante y la experimentación con voltaje frecuenciado. La señal de cada uno de estos modos se puede observar en la Figura 3.8.

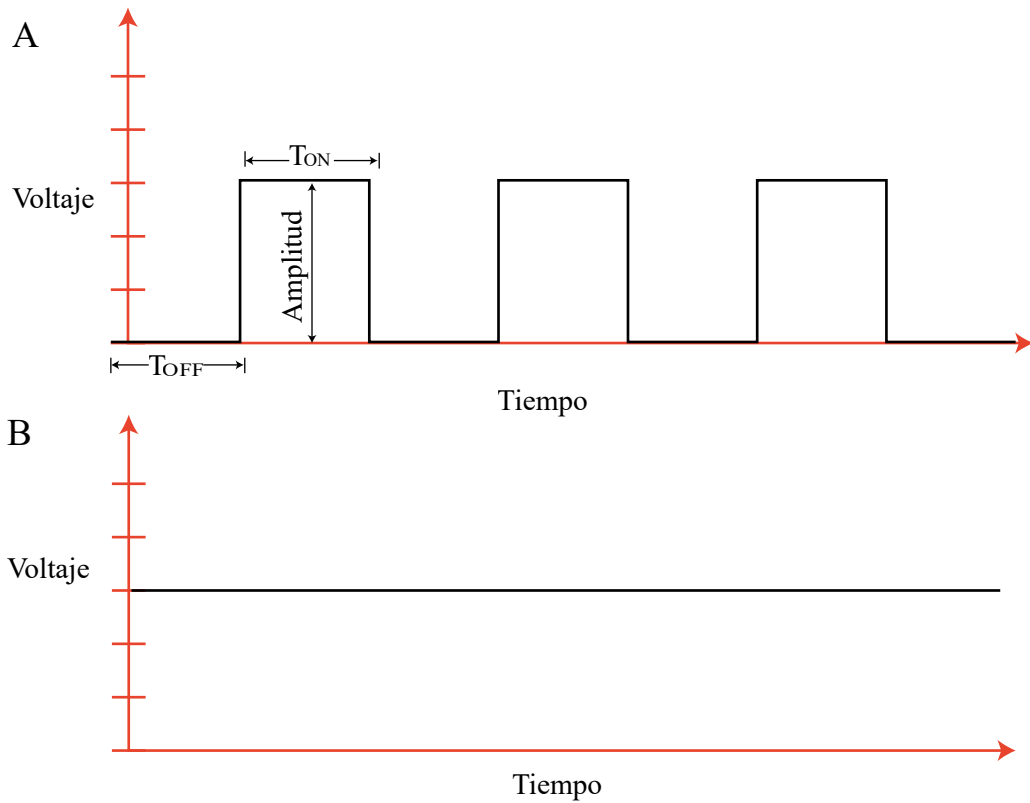


Figura 3.8: A) Señal frecuenciada, B) Señal constante.

3.4.3.1. Fuente de alimentación

El abastecimiento de voltaje de corriente directa se logra mediante una fuente de alimentación de voltaje variable, esta fuente tiene un rango de operación de 0.0 a 30.0 V DC, con un suministro máximo de 10.0 A, la Figura 3.9 muestra la fuente usada.

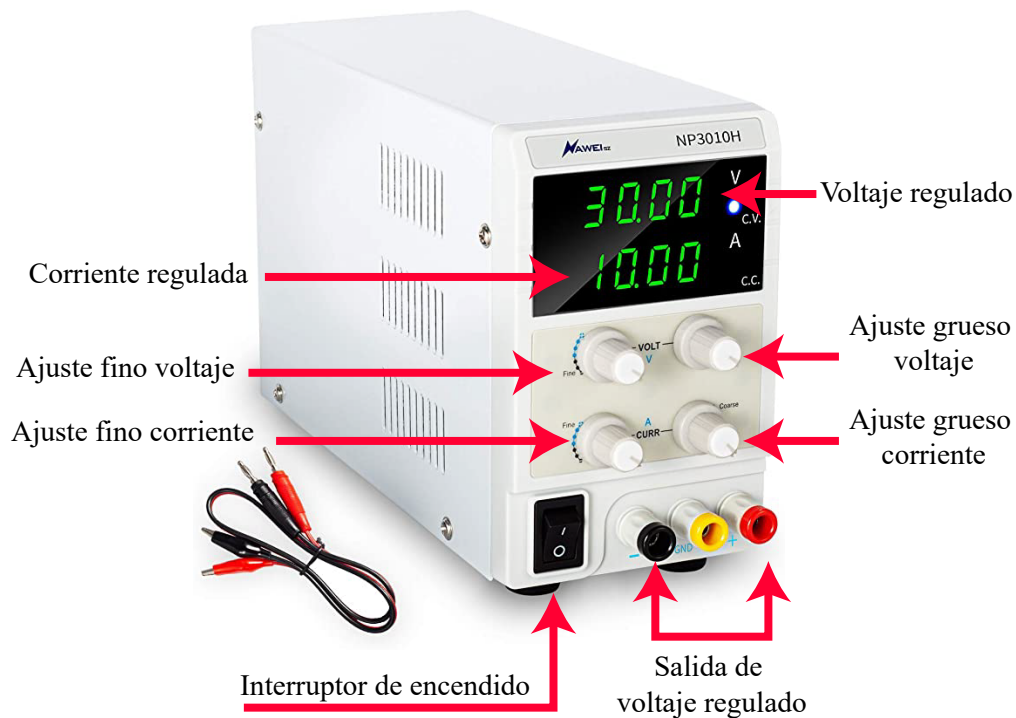


Figura 3.9: Fuente de alimentación.

3.4.3.2. Modulación por ancho de pulsos PWM

Como se indica en la subsección 3.4.3 un modo de operación experimental utiliza voltaje frecuenciado, para lograr que el voltaje suministrado sea en forma de onda rectangular y regulable, se utilizó un módulo PWM. El módulo genera pulsos asíncronos de frecuencia regulable, en nuestro experimento se utilizó una onda rectangular con un ciclo de trabajo del 50.0 % la Ecuación 3.3 describe el ciclo de trabajo.

$$\text{Ciclo de trabajo} = \frac{T_{On}}{T_{Off}} \quad (3.3)$$

Las frecuencias que se utilizan en los experimentos son 1.0, 100.0 y 1000.0 Hz. El generador que se usó para el experimento es el módulo PWM comercial de la marca Unit Electronics (Figura 3.10).

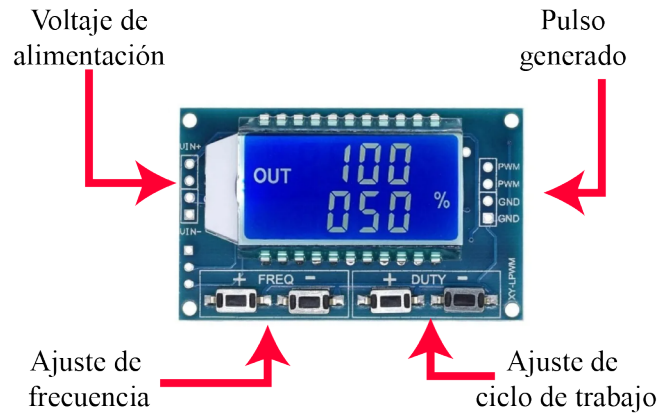


Figura 3.10: Generador PWM.

3.4.3.3. Transistor Mosfet

Para lograr crear un pulso de voltaje frecuenciado con capacidad de suministrar/cortar el voltaje a la frecuencia máxima de 1000 Hz, se utilizó el transistor Mosfet D4184 (Figura 3.11) .

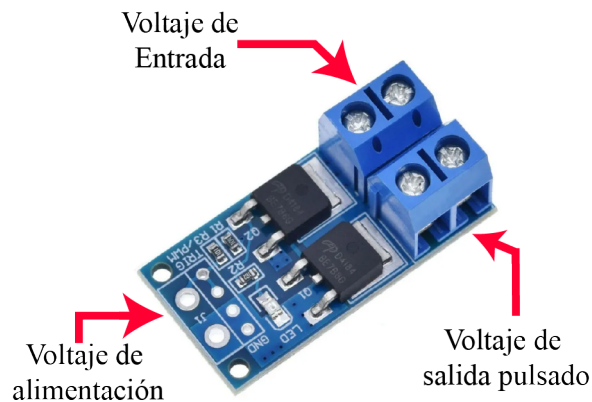


Figura 3.11: Transistor Mosfet.

El voltaje proveniente de la fuente de alimentación regulada se conecta en los bornes de voltaje de entrada, mientras que el módulo se debe alimentar con un voltaje de 5.0 V y del pulso generado por el PWM; de esta manera el transistor funciona como un interruptor que deja fluir/cortar el voltaje en los bornes de salida de voltaje pulsado. Este transistor resulta adecuado para el experimento debido que puede suministrar a

la carga una corriente máxima de hasta 30.0 A y una frecuencia de conmutación de 20 kHz

3.4.3.4. Control eléctrico

El sistema eléctrico consta de un controlador lógico programable (PLC) marca Siemens modelo “Logo!” mostrado en Figura 3.12.

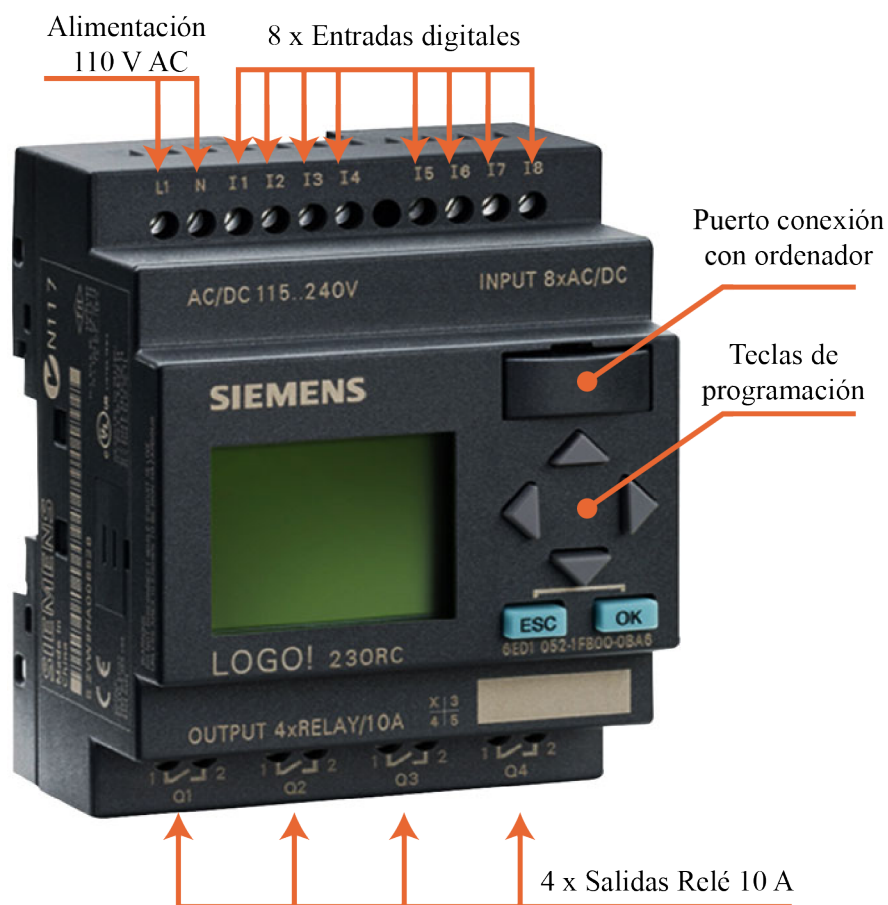


Figura 3.12: PLC Logo!.

Este PCL tiene un rango de alimentación de 115-240 V AC, tiene 8 entradas digitales y 4 salidas digitales de tipo relay con poder de corte de carga resistiva máxima de 10 A. El PLC se puede programar mediante sus teclas frontales usando lenguaje de programación por bloques, o mediante conexión por computadora usando el software Logosoft Confort con lenguaje de programación escalera.

El PLC se programó para controlar los 2 distintos modos de operación de la celda, usando voltaje de alimentación constante o voltaje de onda rectangular. Como

entradas al PLC, se colocan 4 interruptores normalmente abiertos y 1 botón de paro. El botón de paro corta la energía del PLC apagando la celda, mientras que los interruptores controlan los modos de operación de la celda. En las salidas del PLC se conectan las bobinas de los contactores marca Siemens Sirius como se muestra en la figura 3.13.

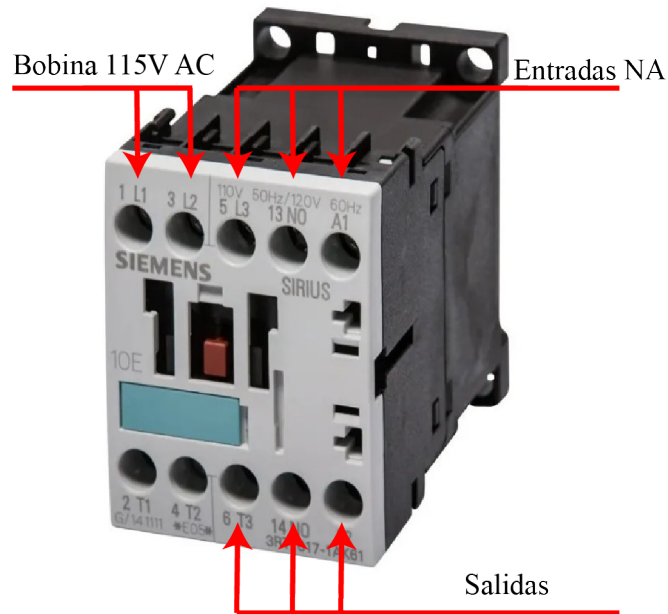


Figura 3.13: Contactores.

Estos contactores son de utilidad como interruptores cuando se activan sus bobinas por medio de la señal del PLC sus contactos normalmente abiertos se cierran dejando fluir voltaje hacia el sistema de sensores y a los electrodos. La Figura 3.14 muestra el esquema del control eléctrico.

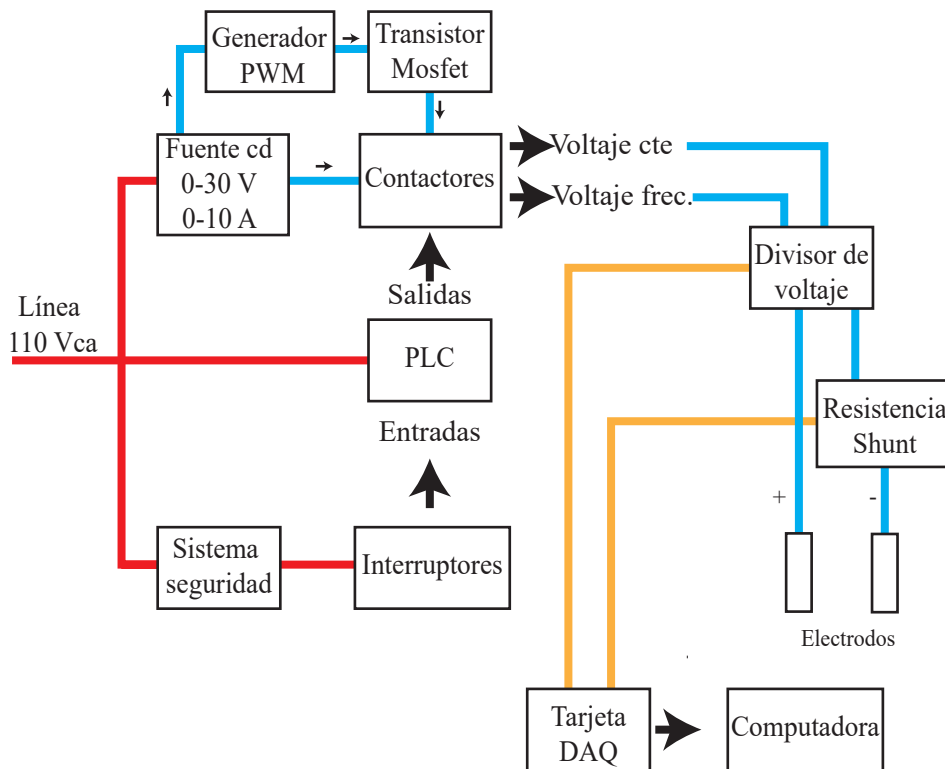


Figura 3.14: Esquema del control eléctrico.

En la Figura 3.3 se muestra las combinación que determinan la funcionalidad de PLC. Por ejemplo si el operador desea trabajar la celda con un voltaje constante durante todo el experimento los interruptores que debe accionar son los a y el c.

Tabla 3.3: Tabla de verdad del control eléctrico.

Interruptores				Respuestas
a	b	c	d	
1	0	1	0	Electrólisis con voltaje constante
1	0	0	1	Electrólisis con voltaje frecuentado
Nota: combinaciones no reportadas no generan ninguna respuesta				

La diferencia entre el modo de voltaje constante y frecuentado se basa en lo siguiente:

- Modo constante, voltaje constante durante todo el experimento.
- Modo frecuentado, PLC utiliza un generador de pulsos asíncrono que activa y desactiva el contacto generando de esta manera una señal de voltaje cuadrada.

3.4.4. Sensores

Como se ha descrito en la sección anterior, las variables que se monitorearon fueron la temperatura, el potencial eléctrico y la corriente eléctrica. En esta sección se detallan las características de cada uno de estos sensores y el tratamiento de sus señales generadas.

3.4.4.1. Temperatura del electrolito

Para esta variable se consideraron dos temperaturas importantes, la temperatura del electrolito en la cuba neumática y la temperatura del ambiente. En el caso de la temperatura del electrolito se utilizó un sensor capaz de sumergirse en líquidos, el sensor que se utilizó es el sensor digital comercial DS18B20 de la marca Maxim integrated mostrado en la Figura 3.15.



Figura 3.15: Sensor DS18B20.

El sensor tiene un rango operativo de $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una resolución de 10 bit. Este sensor tiene un voltaje de operación de 3.3 a 5.0 V. El voltaje de alimentación se conecta en el pin Vcc del sensor.

Al ser un sensor digital y con un protocolo de comunicación serial con la capacidad de enviar y recibir información por medio del mismo cable (Data), se tiene que utilizar la librería proporcionada por el fabricante “1-wire” compilada en lenguaje de programación C, por lo que se utilizó la tarjeta de programación modelo mega de la marca Arduino (Figura 3.16), en esta tarjeta se compiló y se realizó la programación proporcionada por el fabricante para manejar este sensor.

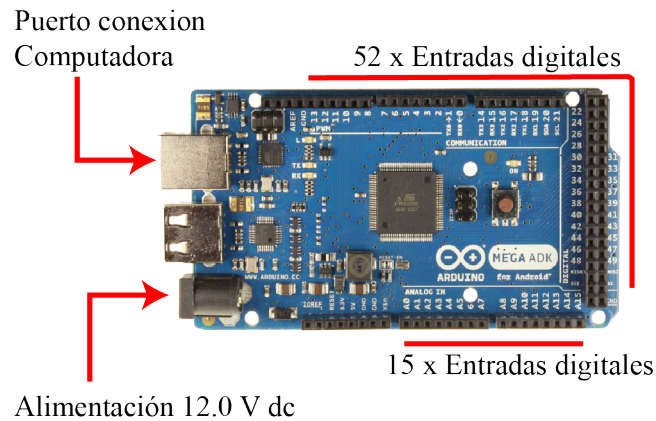


Figura 3.16: Tarjeta Arduino Mega.

3.4.4.2. Temperatura ambiental

La temperatura ambiental se monitorea con el sensor digital DHT11 (Figura 3.17). Este sensor consta de un termistor que mide el aire circundante. El sensor tiene un rango de alimentación de 3.0 a 5.0 V, tiene una capacidad de medir temperaturas entre 0.0 a 50.0 °C con una precisión de $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$, este sensor se programa en la tarjeta Arduino mega usando la librería “DHT” suministrada por el fabricante

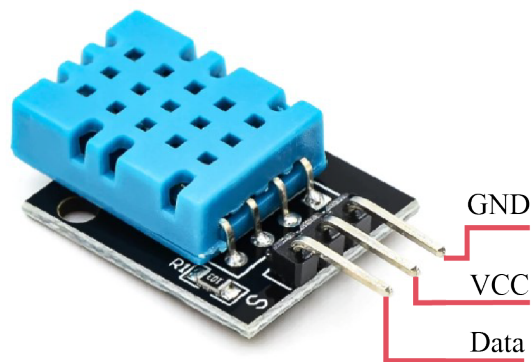


Figura 3.17: Sensor DTH11.

3.4.4.3. Sensor de Voltaje

Para monitorear el voltaje, se utilizó un módulo divisor de voltaje. Este sensor consta de un circuito sencillo de resistencias conectadas en serie como se muestra en la Figura 3.18.

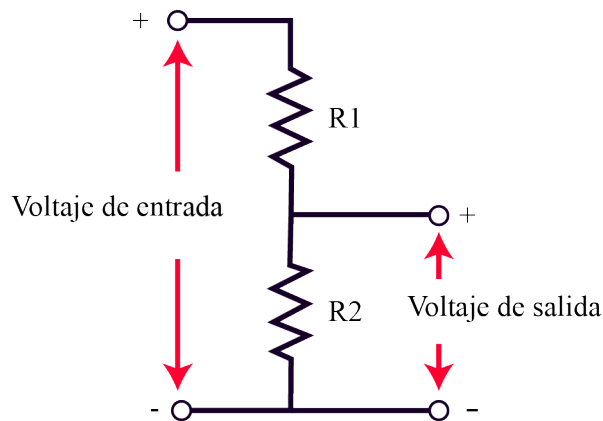


Figura 3.18: Divisor de voltaje.

El funcionamiento de este circuito consiste en escalar el voltaje de entrada por medio de un factor fijo en relación a el valor de las resistencias $R1$ y $R2$, la formula que describe el funcionamiento de un divisor de voltaje se muestra en la Ecuación 3.4.

$$E_{Salida} = E_{Entrada} * \frac{R2}{R1 + R2} \quad (3.4)$$

El divisor de voltaje que se utilizó es un módulo comercial como el mostrado en la Figura 3.19 Este módulo admite un voltaje de entrada de carga de hasta 25.0 V cuando se alimenta el módulo con un voltaje de entrada de 5.0 V. El sensor consta de resistencias $R1 = 30.0 \text{ k}\Omega$ y $R2 = 7.5 \text{ k}\Omega$, por lo que la relación de escalado es de 1:5.

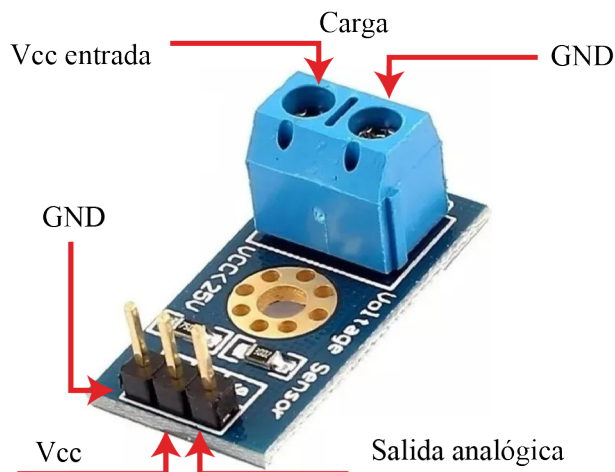


Figura 3.19: Módulo comercial divisor de voltaje.

3.4.4.4. Sensor de Corriente

Para medir la corriente en la celda se utilizó una resistencia del tipo Shunt. Estas resistencias sirven para medir la corriente de manera indirecta, es decir a partir de la diferencial de tensión entre sus terminales y conociendo la resistencia eléctrica (R), se puede conocer la corriente (I) que la atraviesa por medio de la ley de Ohm (Ecuación 3.5).

$$E_{Celda} = I * R \quad (3.5)$$

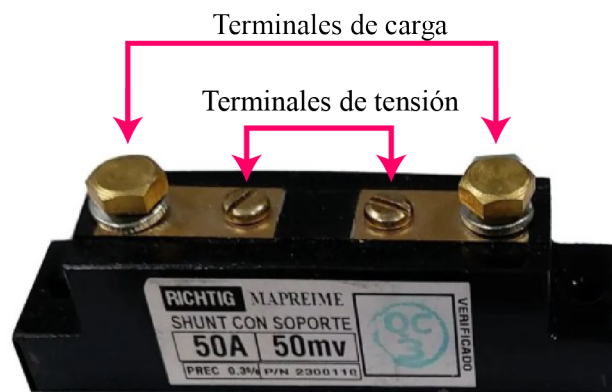


Figura 3.20: Resistencia Shunt.

En la Figura 3.20 se observa la resistencia Shunt en físico. Esta resistencia es de la marca Richting, soporta una corriente máxima de 20.0 A generando un voltaje máximo de 20.0 mV entre sus terminales, la precisión es de 0.5 %.

Debido que el voltaje de salida de la resistencia Shunt es del orden de los mili volts, se le acopla a la salida un amplificador de instrumentación AD620 (Figura 3.21). Este chip se alimenta con 12.0 V, la señal de entrada puede ser entre 100 μ V a 300 mV y la señal de salida puede ser amplificada de 1.5 a 1000 veces. En el experimento se ajustó la amplificación de 200 veces.

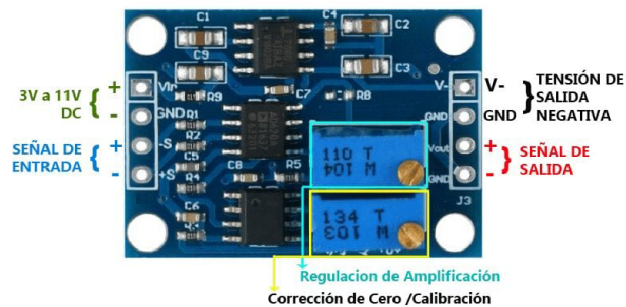


Figura 3.21: Amplificador de instrumentación.

3.4.4.5. Calibración de sensores de medición

Para asegurar que las mediciones sean exactas y precisas, se comparó 10 veces en diferentes valores de cada sensor contra un instrumento de medición de laboratorio. En el caso de las temperaturas se utilizó un termómetro de laboratorio de mercurio, mientras que el sensores de corriente y voltaje se verificaron con un osciloscopio.

El osciloscopio usado fue el modelo TDS2014B de la marca Tektronix Figura 3.22. El osciloscopio puede medir el voltaje constante así como en onda rectangular; es posible verificar la amplitud y el periodo de la onda.

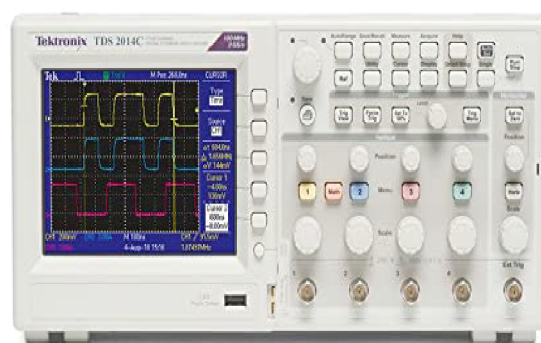


Figura 3.22: Osciloscopio.

En cuestión de la temperatura es suficiente que el valor de los sensores coincida con el valor entero, debido que el termómetro tiene graduación de 1.0 °C, mientras que

en los valores de voltaje y corriente se consideró como una medición aceptable de 2 centésimas de diferencia contra la del osciloscopio.

3.4.4.6. Tarjeta de adquisición de datos DAQ

Para procesar las señales de los sensores analógicos se utilizó el módulo de entrada de voltaje NI-9215 de National Instruments, este módulo posee 4 canales de entrada simultaneas, con un rango de entrada de $\pm 10,0$ V, tiene una resolución de 16 bits y una capacidad de realizar hasta 100 000 muestras por segundo y por canal. Las entradas son del tipo de conector “Bayonet Neill-Concelman” BNC. El sistema modular se muestra en la Figura 3.23.

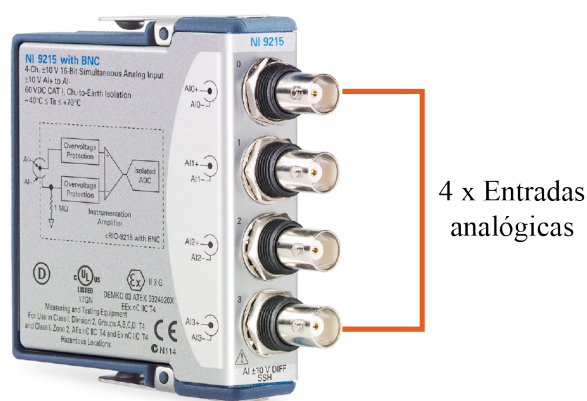


Figura 3.23: Módulo NI-9215.

Para conectar los sensores se utilizó cable coaxial RG58 (Figura 3.24). Este cable consta de un conductor central de cobre, aislamiento de polietileno, un blindaje electromagnético contra interferencias formado por un trenzado de cobre estañado y cubierta exterior de policloruro.

El núcleo transporta la señal electrónica que constituye la información. El polietileno funciona como una capa dieléctrica que separa el núcleo del aislamiento. El aislamiento funciona como masa y protege al núcleo del ruido externo. Por último la capa de policloruro sirve como protector de las inclemencias meteorológicas.



Figura 3.24: Cable coaxial RG58.

Para utilizar el módulo NI-9215 se debe montar en el chasis cDAQ-9178 (Figura 3.25). Este chasis tiene la capacidad de operar 7 módulos diferentes brindando conexión sencilla con la computadora por medio del cable “Universal Serial Bus” USB.



Figura 3.25: Chasis cDAQ-9178.

3.4.4.7. Software Labview

La tarjeta DAQ recopila la información de los sensores analógicos (voltaje y corriente). En este software se procesan los datos para evaluar su ajuste al modelo lineal utilizado. Las ecuaciones se obtuvieron mediante una método de comparación con valores críticos. Los puntos críticos del voltaje fueron 0.0, 6.0, 9.0, 12.0, 15.0, y 30.0 V. En el caso de la corriente se utiliza como valores críticos 30 puntos entre 0.0 a 10.0 A. La Ecuación 3.6 muestra el modelo lineal asociado al divisor de voltaje. La Ecuación 3.7 muestra el modelo lineal asociado al amplificador de instrumentación AD620.

$$E_{Celda} = 5,5924 * Valor_{Sensado} - 0,2953 \quad (3.6)$$

$$I = 1,9983 * Valor_{Sensado} - 0,4782 \quad (3.7)$$

El software Labview permite crear una interfaz de usuario, en la cual se configura el módulo a utilizar y permite visualizar en tiempo real los datos de la corriente y voltaje por medio de graficas. En la Figura 3.26 se muestra la interfaz de usuario utilizada.

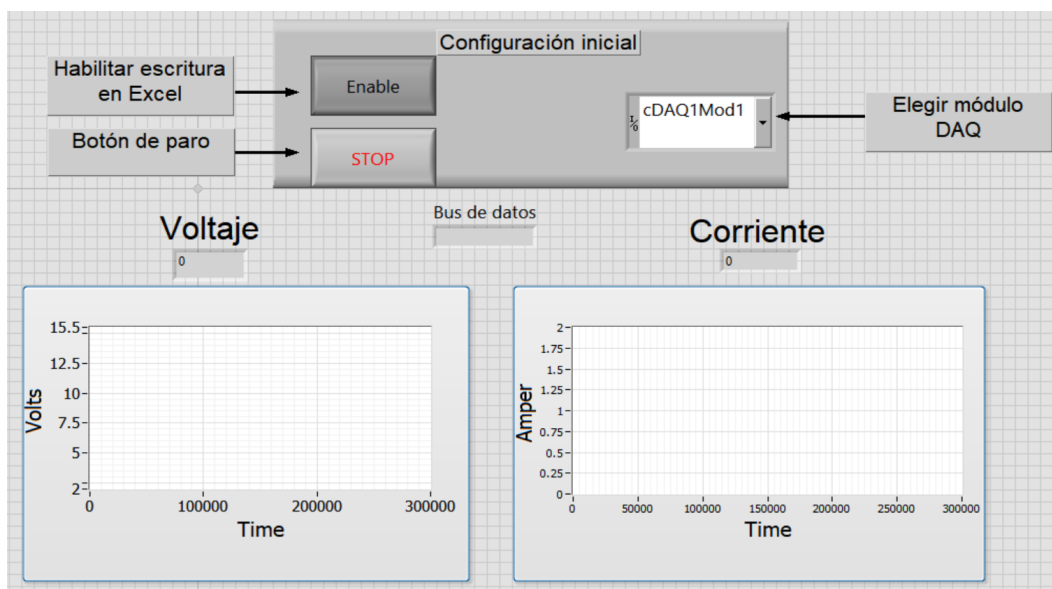


Figura 3.26: Interfaz de usuario.

A continuación se describen las funciones de cada uno de los elementos de la interfaz de usuario:

1. Botón Enable: Este botón habilita la escritura de los datos de corriente, voltaje, temperatura ambiental y temperatura del electrolito en una hoja de Excel.
2. Botón de paro: Este botón detiene la ejecución de la interfaz de usuario, si el sistema está escribiendo datos en la hoja de Excel, interrumpe la escritura y el software pregunta con que nombre y en que carpeta guardar el archivo generado.
3. Elegir módulo: Este combo-box permite buscar y configurar todos los módulos que se encuentran conectados al ordenador.
4. Gráficas: En estas se grafican el voltaje y la corriente contra el tiempo de ejecución.

5. Bus de datos: Muestra los datos que están en transferencia entre la tarjeta DAQ y el ordenador.

En la Figura 3.27 se muestra el código Labview de la interfaz de usuario.

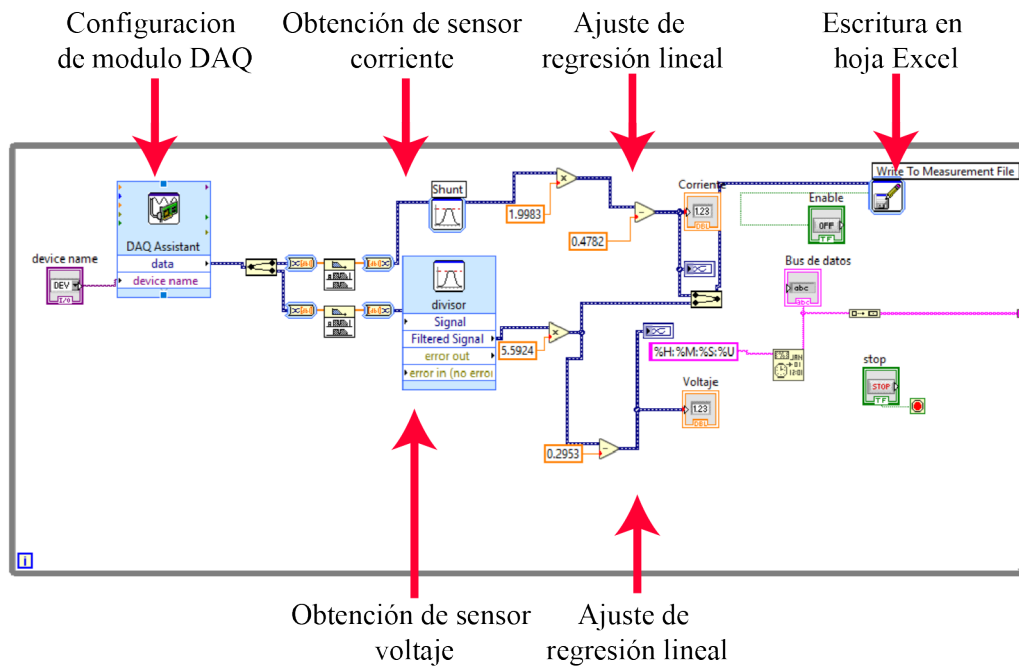


Figura 3.27: Código Labview.

3.4.4.8. Tarjeta Arduino

Las señales digitales de temperatura fueron procesadas por la tarjeta Arduino Mega. Los valores de las temperaturas se visualizan en un LCD 16.0 x 2.0, al LCD se le conecta un potenciómetro de 10.0 kOhm para regular el contraste de la pantalla y la respuesta en el LCD ayuda a verificar que los sensores estén funcionando correctamente. La Figura 3.28 muestra cómo están conectados los sensores digitales con la tarjeta Arduino.

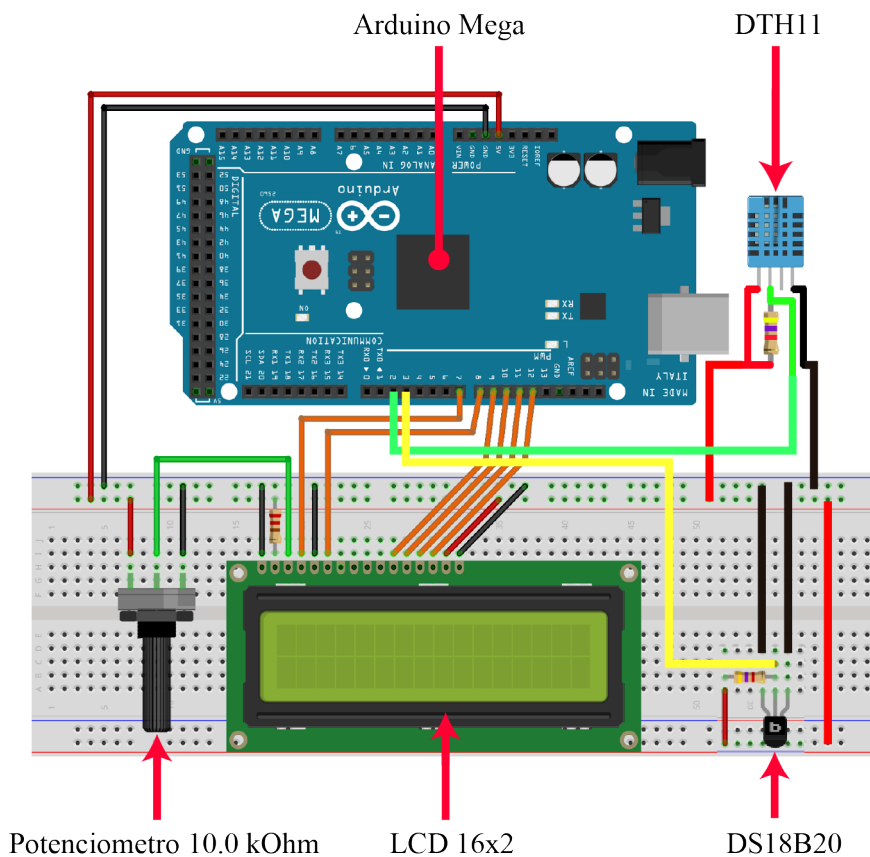


Figura 3.28: Montaje de sensores digitales.

3.5. Preparación de la celda

Al iniciar cada prueba, se realizó un lavado de embudos de separación como se describe en la sección 3.2, este proceso se realizó en una cámara de flujo laminar para prevenir inhalar los gases del ácido.

La cámara de flujo laminar produce un flujo de aire ascendente, este flujo arrastra de manera ascendente los gases que se acumulen en el área de trabajo y los expulsa al ambiente a una altura segura. En la Figura 3.29 se muestra la celda de electrólisis dentro de la cámara de flujo laminar.



Figura 3.29: Cámara de flujo laminar.

3.6. Hipótesis de diseño de experimentos

Se realizó un análisis de varianza con un modelo lineal generalizado considerando tres variables de respuesta: flujo volumétrico, corriente y parámetro de desempeño. Los factores de interés son: voltaje, frecuencia y concentración, con el objetivo de aprobar/rechazar las siguientes hipótesis experimentales:

- Las variables experimentales voltaje, concentración y frecuencia generan un efecto sobre las respuestas.
- Existe un nivel de las variables experimentales que generan máximos o mínimos locales en las respuestas.
- La combinación de los diferentes niveles de las variables voltaje-frecuencia, voltaje-concentración, concentración-frecuencia o voltaje-frecuencia-concentración, generan un efecto sobre las respuestas.

3.7. Metodología experimental

En este trabajo de investigación se consideraron 6 parámetros de los cuales 3 son controlables (variables independientes): concentración de electrolito, voltaje y frecuencia de onda, mientras que las variables de respuesta (variables dependientes) fueron la corriente eléctrica y los flujos volumétricos de hidrógeno y de oxígeno. En la Tabla 3.4 se muestran las variables involucradas y los niveles experimentales.

Tabla 3.4: Listado parámetros experimentales.

Factores del Modelo de Experimentación	Valores (Niveles)			
Resistencia de los electrodos (Ohm)	1.2			
Separación de los electrodos (mm)	125.0			
Concentración del electrolito (Mol/L)	0.125	0.250	0.375	0.500
Voltaje (V)	6.0	9.0	12.0	15.0
Frecuencia de onda (Hz)	0.0	1.0	10.0	100.0
Temperatura (°C)	Ambiente (22-25)			
Parámetros dependientes	Valores			
Corriente (A)	Medible			
Flujo volumétrico hidrógeno (mL/s)	Medible			
Flujo volumétrico oxígeno (mL/s)	Medible			

El efecto de la presencia de estos factores de interés se analizó utilizando 4 niveles (tratamientos) por factor, con 3 repeticiones por nivel. Se utilizó un proceso estricto de aleatorización para generar la matriz experimental mostrada en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Matriz experimental.

Factor	Leyenda	Nivel			
		1	2	3	4
Concentración (Mol/L)	A	0.125	0.250	0.375	0.500
Voltaje (V)	B	6.0	9.0	12.0	15.0
Frecuencia de onda (Hz)	C	0.0	1.0	10.0	100.0

Se generaron un total de 192 valores en la variable de respuesta, la configuración de los factores para cada respuesta se anexa al final del escrito.

Capítulo 4

Resultados energéticos en la producción de hidrógeno

El diseño de experimentos considera un análisis estadístico basado en el análisis de la variabilidad que se produce al emplear tres factores importantes (frecuencia, voltaje y concentración). Se empleó un diseño factorial completamente aleatorio utilizando cuatro niveles por cada uno de los factores, con la finalidad de visualizar el efecto de los factores en cada una de las variables respuesta.

A continuación, se muestran los resultados del análisis de varianza para las 3 respuestas del sistema (flujo volumétrico, corriente y parámetro de desempeño).

4.1. Resultados y discusión

4.1.1. Modelo lineal generalizado para flujo volumétrico

En La Tabla 4.1 se resumen los resultados del ajuste estadístico lineal, relacionando el flujo volumétrico (variable de salida) con las variables de entrada mencionados. De acuerdo a la literatura, para valores $P < 0.05$, se determina que existe una relación estadísticamente significativa entre flujo volumétrico y las variables de entrada con un nivel de confianza del 95.0 %.

Tabla 4.1: Análisis de varianza para flujo volumétrico.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-f	Valor-P
Modelo	9.8886	63	0.1569	689.3500	0.0000
Residuo	0.0291	128	0.0002		
Total	9.9177	191			

La Tabla 4.2 ANOVA para Flujo volumétrico prueba la significancia estadística de cada factor conforme fue introducido al modelo estadístico (modelo estadístico lineal) seleccionado. Dado que todos los valores $P < 0.05$, se concluye que las fuentes de variación consideradas, son estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95.0 %.

Tabla 4.2: ANOVA para flujo volumétrico.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Voltaje	3.3915	3	1.1305	4964.98	0.0000
Frecuencia	2.1727	3	0.724246	3180.77	0.0000
Concentración	2.9276	3	0.975892	4285.96	0.0000
Voltaje-Frecuencia	0.4387	9	0.0487522	214.11	0.0000
Voltaje-Concentración	0.5021	9	0.0557973	245.05	0.0000
Frecuencia-Concentración	0.3688	9	0.0409886	180.02	0.0000
Voltaje-Frecuencia-Concentración	0.0868	27	0.00321629	14.13	0.0000
Residuo	0.0291	128	0.000227695		
Total (corregido)	9.91775	191			

Con base en la variabilidad de las fuentes de variación consideradas en el modelo, se observa que el Voltaje es el que tiene una mayor influencia en la variable respuesta, seguido de la concentración y la Frecuencia, respectivamente. Asimismo, es posible observar que las diferentes interacciones consideradas, también participan como fuentes generadoras de efectos significativos en la variable respuesta.

4.1.2. Modelo lineal generalizado para corriente

En la Tabla 4.3 se observa que el valor $P < 0.05$, mostrando que los factores de interés que fueron considerados tienen un efecto significativo en la variable respuesta.

Tabla 4.3: Análisis de varianza para corriente.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	697.452	63	11.0707	1715.46	0.0000
Residuo	0.826044	128	0.00645347		
Total (Corr.)	698.278	191			

La Tabla muestra la significancia estadística de cada factor conforme fue introducido al modelo. De las variables involucradas el voltaje y la concentración son las que más respuesta producen en la corriente eléctrica. En este caso la frecuencia tiene una participación nula. Sin embargo la combinación entre las variables de voltaje y concentración si representa una influencia significativa en la corriente eléctrica

Tabla 4.4: ANOVA para corriente.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón F	Valor-P
Voltaje	347.915	3	115.972	17970.42	0.000
Frecuencia	0.052	3	0.017	2.74	0.046
Concentración	300.123	3	100.041	15501.90	0.000
Voltaje-Frecuencia	0.024	9	0.002	0.43	0.916
Voltaje-Concentración	49.120	9	5.457	845.72	0.000
Frecuencia-Concentración	0.037	9	0.004	0.64	0.759
Voltaje-Frecuencia-Concentración	0.178	27	0.006	1.02	0.442
Residuo	0.826	128	0.006		
Total (corregido)	698.278	191			

4.1.3. Modelo lineal generalizado para parámetro de desempeño

El parámetro de desempeño (ecuación 2.18) muestra confiabilidad y relación con las variables independientes. Este parámetro tiene como función revelar un comportamiento de la celda involucrando todas las variables independientes.

Tabla 4.5: Análisis de varianza para parámetro de desempeño.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1.70821E6	63	27114.5	249.13	0.0000
Residuo	13931.2	128	108.838		
Total (Corr.)	1.72214E6	191			

La Tabla 4.6 prueba la significancia estadística de cada factor conforme fue introducido al modelo. Esto permite justificar la incorporación de las tres variables independientes en el experimento. La ventaja de lograr detectar la influencia de las tres variables seleccionadas, es la determinación de valores críticos de operación eficientes, para optimizar la producción de hidrógeno.

Se pueden observar valores de P, mayores que 0.05, correspondientes a las interacciones. Esto permite interpretar que no existe evidencia estadística que indique que hay interacción entre los factores voltaje-frecuencia, frecuencia -concentración y en los tres factores simultáneamente.

Tabla 4.6: ANOVA para parámetro de desempeño.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Voltaje	1.690E6	3	564471.000	5186.350	0.000
Frecuencia	2314.050	3	771.340	7.090	0.000
Concentración	2567.340	3	855.781	7.860	0.000
Voltaje-Frecuencia	2399.560	9	266.617	2.450	0.013
Voltaje-Concentración	905.390	9	100.600	0.920	0.506
Frecuencia-Concentración	2529.500	9	281.056	2.580	0.009
Voltaje-Frecuencia-Concentración	4086.220	27	151.341	1.390	0.115
Residuo	13931.200	128	108.838		0.000
Total (corregido)	1.720E6	191			

4.1.4. Flujo volumétrico de hidrógeno como función de la concentración

En la Figura 4.1, se muestran los resultados asociados a la variable de flujo volumétrico como función de la concentración. En el modelo experimental se fijó una base de 30.0 mL de hidrógeno como criterio predominante. En la interpretación de los datos se observa que el flujo volumétrico se incrementa como función de la concentración y del potencial eléctrico. El voltaje frecuenciado (1.0 Hz) tiende a reducir la tasa de generación de hidrógeno. Sin embargo, la velocidad de producción de hidrógeno no muestra efecto para frecuencia superiores a 1.0 Hz. Por otro lado, la dependencia de la concentración sobre la producción de hidrógeno va disminuyendo conforme se incrementa la molaridad. Los resultados conducen a la existencia de una masa crítica en una concentración de 0.250; y por lo tanto, es recomendable concentrar el análisis en la vecindad de dicho valor.

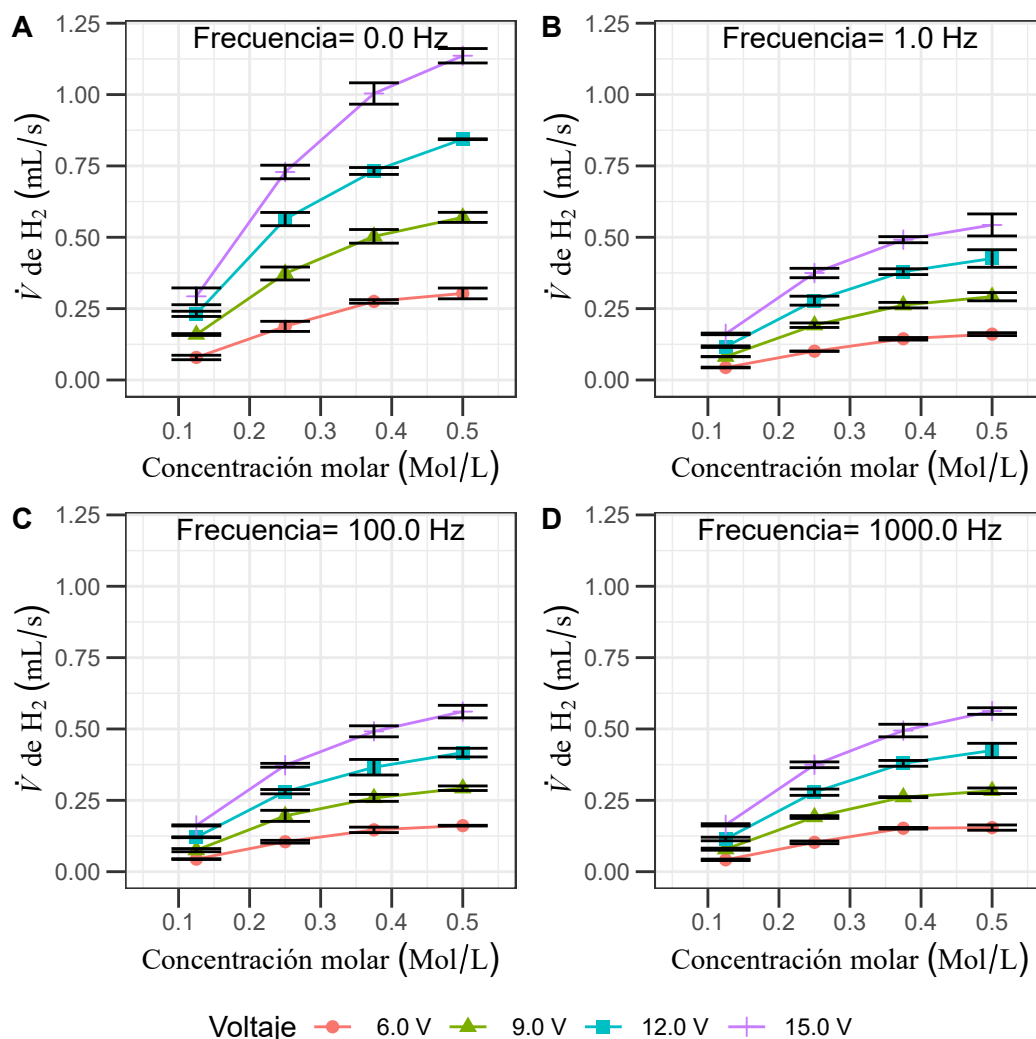


Figura 4.1: Flujo volumétrico vs Concentración molar.

4.1.5. Eficiencias de Faraday en la producción de hidrógeno

En la Figura 4.2 se muestran las eficiencias de Faraday como función de la concentración. Se observa que existe una falta de regularidad estadística en el comportamiento de esta variable, debido a que existen fluctuaciones que oscilan dentro del rango de 90-96 %. Las oscilaciones se deben a la dependencia del volumen de hidrógeno con la temperatura. En el modelo experimental la temperatura del electrolito es una variable no controlable. Por este motivo es recomendable llevar a cabo el análisis con un parámetro de desempeño más estable para llegar a conclusiones sobre el comportamiento energético en la producción de hidrógeno.

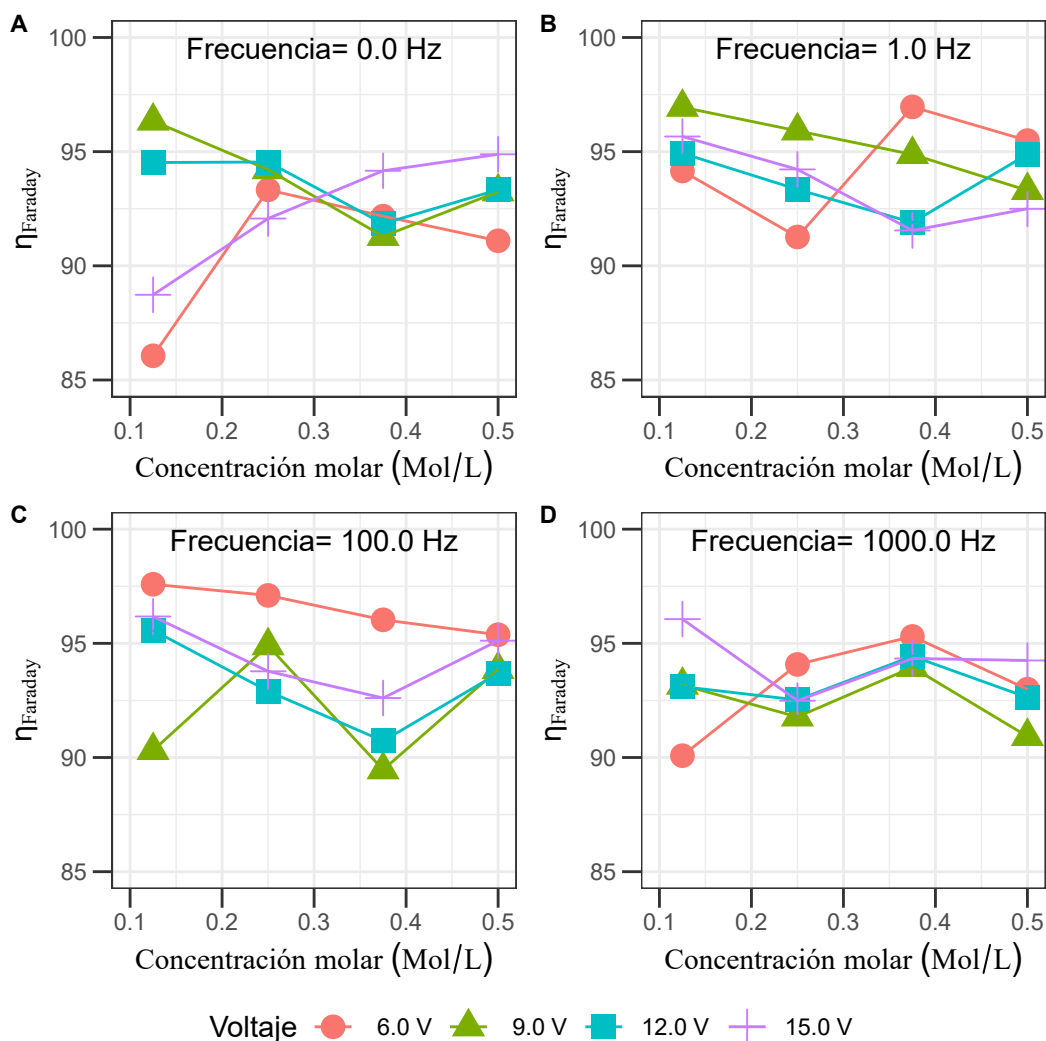


Figura 4.2: Eficiencia de Faraday vs Concentración molar.

4.1.6. Parámetro de desempeño en función de la concentración

En la Figura 4.3 se muestran el costo energético por unidad de masa como función de la concentración. Se observa en que el parámetro de desempeño presenta una baja dependencia de la concentración manteniéndose en una respuesta prácticamente horizontal. Sin embargo, se logra identificar un menor costo energético por unidad de masa para el nivel energético de 6.0 V. De la misma manera que en los resultados previos, la energía se reduce para concentraciones molares entre 0.25 y 0.375.

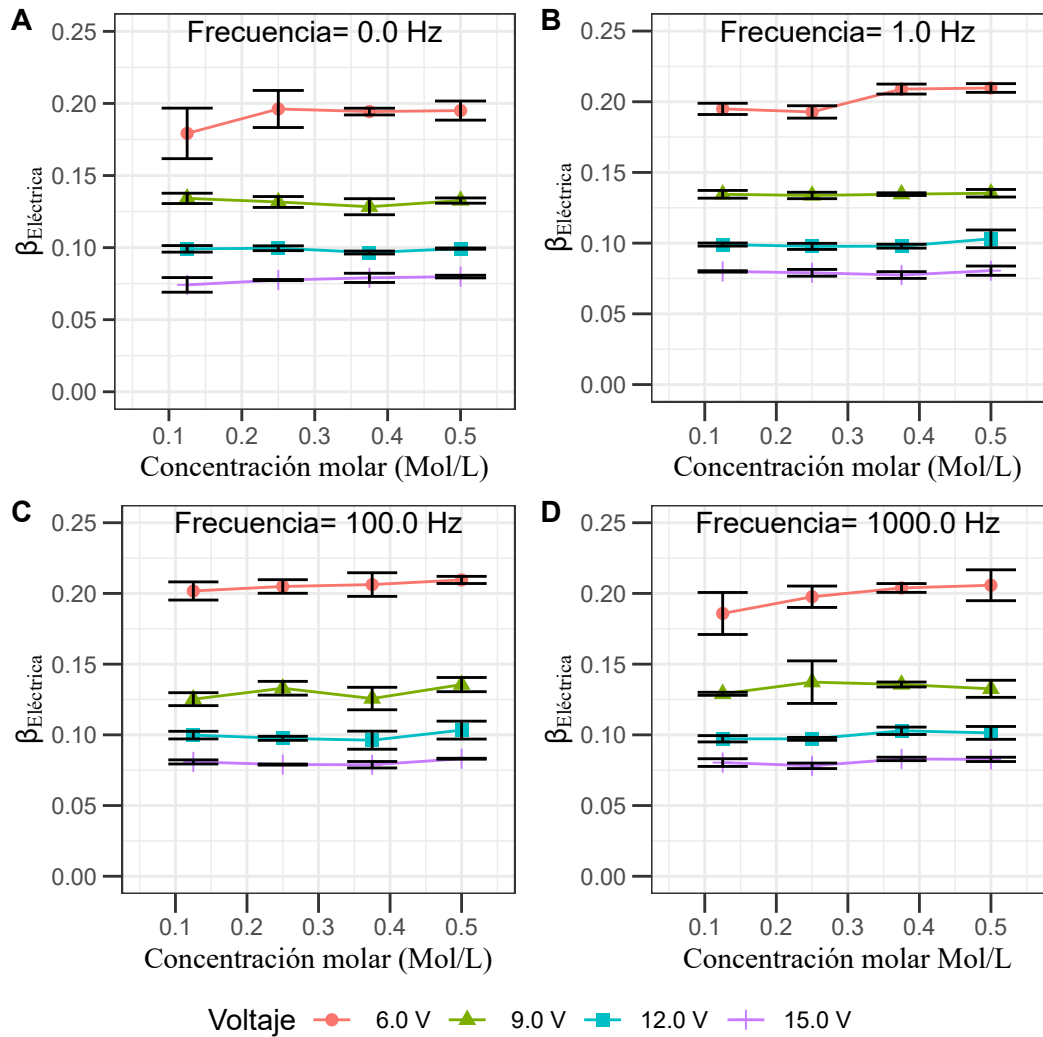


Figura 4.3: Parámetro de desempeño vs Concentracion Molar.

4.1.7. Costo eléctrico por unidad de kilogramo de hidrógeno

Conociendo la tarifa eléctrica local se puede obtener el costo de producción por unidad de kilogramo, en la Figura 4.4 se presentan la energía invertida por unidad de masa como función de la concentración, voltaje y frecuencia. Al igual que los resultados de eficiencia de segunda ley se concluye de manera general que el costo de producción de hidrógeno se reduce conforme el voltaje suministrado se acerca al voltaje de referencia en un proceso ideal. El costo de producción mínimo en el rango estudiado corresponde para 6.0 V, 1.0 Hz y 0.5 M. Para el mínimo local de 156.3 kW-h/kg existen oscilaciones en el costo de la producción de hidrógeno con respecto a la concentración. Por ejemplo para un voltaje de 6.0 V y concentraciones de 0.125 y 0.375 resulta tener los mismos costos de producción. La diferencia entre ambos valores la genera la tasa de

producción de hidrógeno; para el primer valor se produce una tasa de 0.0788 mL/s y para el segundo de 0.2752 mL/s. Determinando así una preferencia para trabajar con el segundo escenario. La frecuencia eléctrica actuó inversamente proporcional a la tasa de producción de hidrógeno y actuó en forma oscilatoria con respecto al costo eléctrico por ende los puntos de operación están determinados por los casos a voltaje constante y elevada concentración para mismos costos de producción de hidrógeno. Por lo tanto, a partir del costo de producción se pueden determinar los puntos de operación mediante la Figura 4.4 y la Figura 4.1.

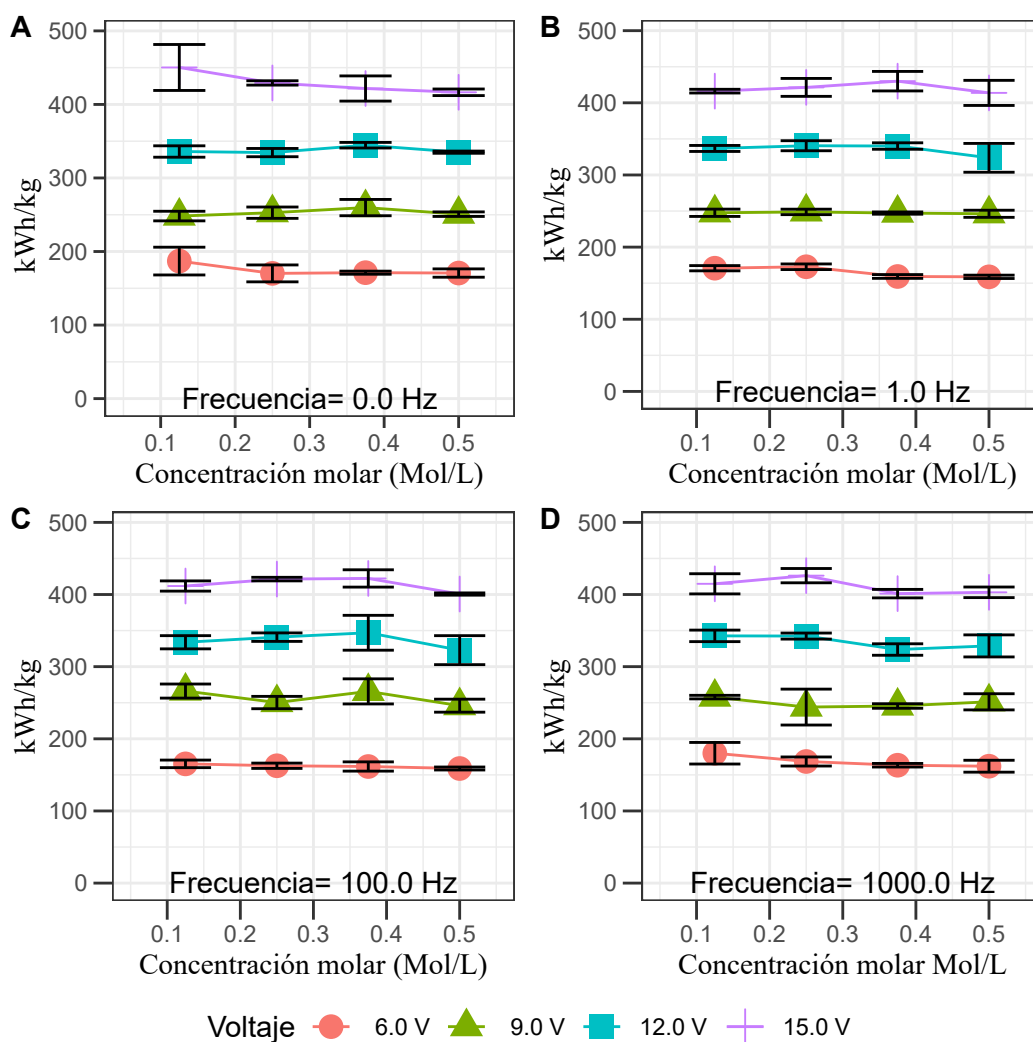


Figura 4.4: Costo eléctrico por unidad de kilogramo de hidrógeno.

Mediante el establecimiento de una tarifa eléctrica se puede desarrollar un calculo para el costo del hidrógeno por unidad de masa. De acuerdo a los resultados de esta investigación y estableciendo un costo eléctrico de 1.0 \$ (MXN) por cada kWh

se obtiene un costo de producción de hidrógeno de 156.3 \$/kg. La tarifa eléctrica depende del consumo eléctrico, ubicación geográfica, estación climática, etc. con un rango de 0.85 a 3.2 \$ por cada kWh. Se puede hacer también el comparativo del costo del hidrógeno por unidad de energía con respecto a los combustibles actuales. Con la misma referencia de 1.0 \$ por cada kWh como tarifa eléctrica se obtiene el valor de 1.072 \$/MJ de hidrógeno producido en el punto óptimo. Por su parte el costo de la gasolina (agosto, 2022) por unidad de energía es de 0.630 \$/MJ, el del diesel es de 0.65 \$/MJ y el del gas Lp de 0.50 \$/MJ. Aunque el hidrógeno aun se encuentra por encima de los precios de los energéticos comunes se debe considerar la influencia de la eficiencia energética para transformar los energéticos en energía eléctrica.

4.2. Análisis de efectos principales

Considerando que los tres factores de interés tienen un efecto sobre las variables respuestas definidas, es posible justificar el análisis de los efectos principales en cada uno de los modelos

4.2.1. Gráfico de efectos principales para flujo volumétrico

En la Figura 4.5 se muestra el efecto principal ocasionado por la presencia de cada uno de los 3 factores que afectan el funcionamiento de la celda voltaje, concentración y frecuencia de onda. Consistentemente, el resultado obtenido del análisis estadístico revela que la producción de hidrógeno tiene una alta influencia del voltaje y molaridad y una dependencia de la frecuencia únicamente en el rango de 0.0 a 1.0 Hz.

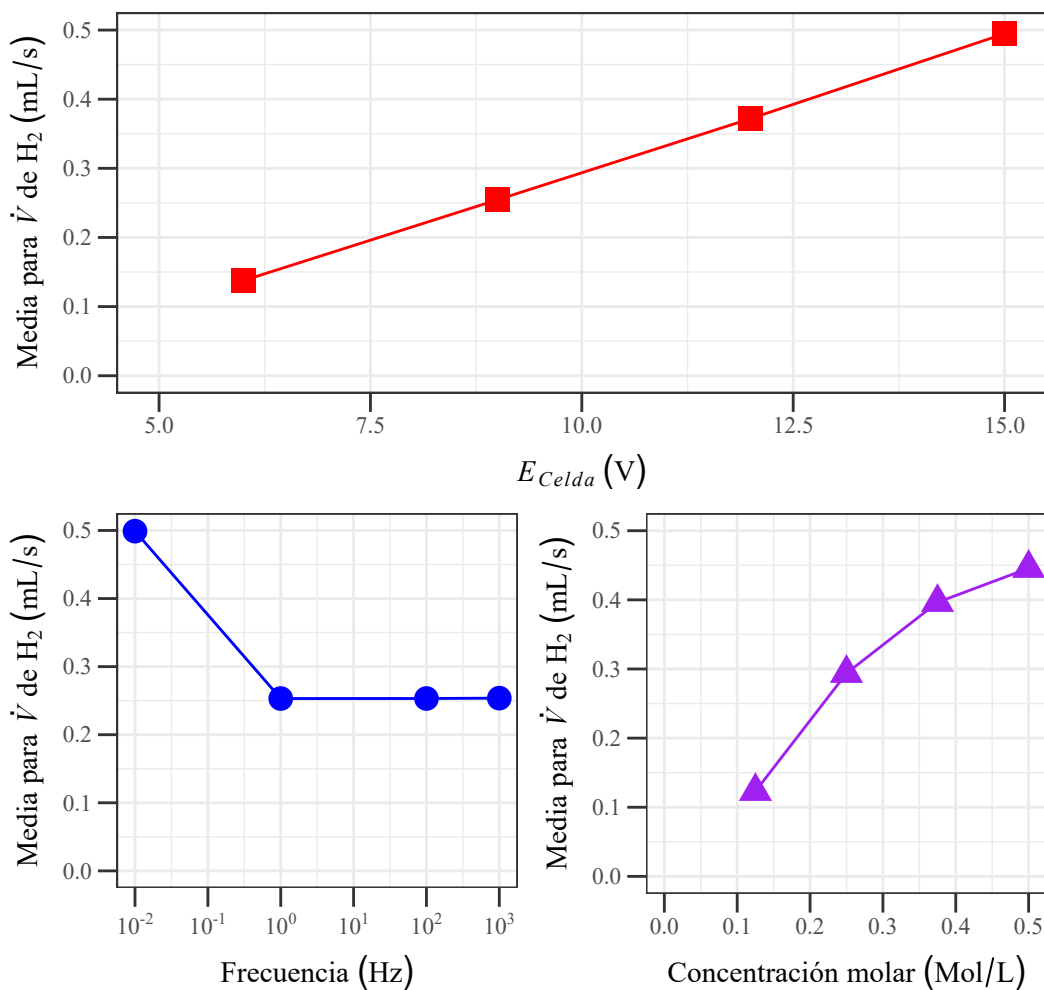


Figura 4.5: Efectos principales para flujo volumétrico.

Los resultados obtenidos en este estudio para el nivel de energía más bajo, fue de 0.27 mL/s de H_2 , con 6 V y 0.5 M de electrolito de NaOH. Por su parte [47] reporta 0.03 mL/s de H_2 con 2.0 V y una concentración molar del electrolito de 0.3. Por otro lado, se tiene referencia de [48] quienes obtuvieron una producción de hidrógeno de 0.02 mL/s bajo las condiciones de 4.0 V y 0.5 M de NaOH. Las oscilaciones se deben principalmente a la configuración del modelo experimental. Es muy frecuente encapsular los electrodos con los tubos de captación, esta configuración interfiere con el campo eléctrico y por añadidura en la producción de hidrógeno. En esta investigación se evito la interferencia entre los los electrodos y los recipientes de contención en la medida de lo posible. El incremento significativo en la generación de hidrógeno observado en esta investigación se debe en gran medida a la configuración experimental

seleccionada.

En la investigación [27], los autores encontraron que al utilizar un ánodo de grafito durante la electrólisis, la respuesta de la corriente aumentó con un aumento en la temperatura de funcionamiento, además la tasa de producción posterior también aumentó, pero la eficiencia actual disminuyó con un aumento en la temperatura de funcionamiento para los materiales del cátodo probados, también mencionan que tal comportamiento se puede atribuir a las partículas de carbono que obstruyen el proceso de reducción al bloquear el poro de óxido y evitar que el óxido entre en contacto con el electrolito. En este trabajo, los resultados demuestran una producción de hidrógeno de un orden de magnitud mayor a otro estudio. La diferencia radica en el nivel de interferencia al campo eléctrico que con frecuencia ocurre en los prototipos experimentales. Esta investigación se llevó a cabo bajo condiciones de interferencia mínima en el campo eléctrico, generando de manera una mejora notable en el proceso de la producción de hidrógeno.

4.2.2. Gráfico de efectos principales para corriente

La respuesta de la corriente muestra dependencia del voltaje y de la concentración. La corriente presenta una respuesta lineal con el voltaje. Sin embargo la concentración presenta una elevada sensibilidad al inicio de la concentración y se va perdiendo conforme se incrementa. Nuevamente en este grafico de efectos principales muestra que la frecuencia tiene un papel mínimo sobre la corriente en el sistema. Como la corriente eléctrica esta asociada a la tasa de producción de hidrógeno, se concluye que la tasa de producción de hidrógeno se mejora a elevados voltajes y elevada concentración. La respuesta no lineal de la concentración con respecto a la corriente conlleva a la existencia de puntos de operación óptimos. El gráfico revela una concentración de 0.250 M como punto de operación. En caso de tener una malla mas fina para la concentración se podría identificar con mayor detalle el punto de operación. Figura 4.6.

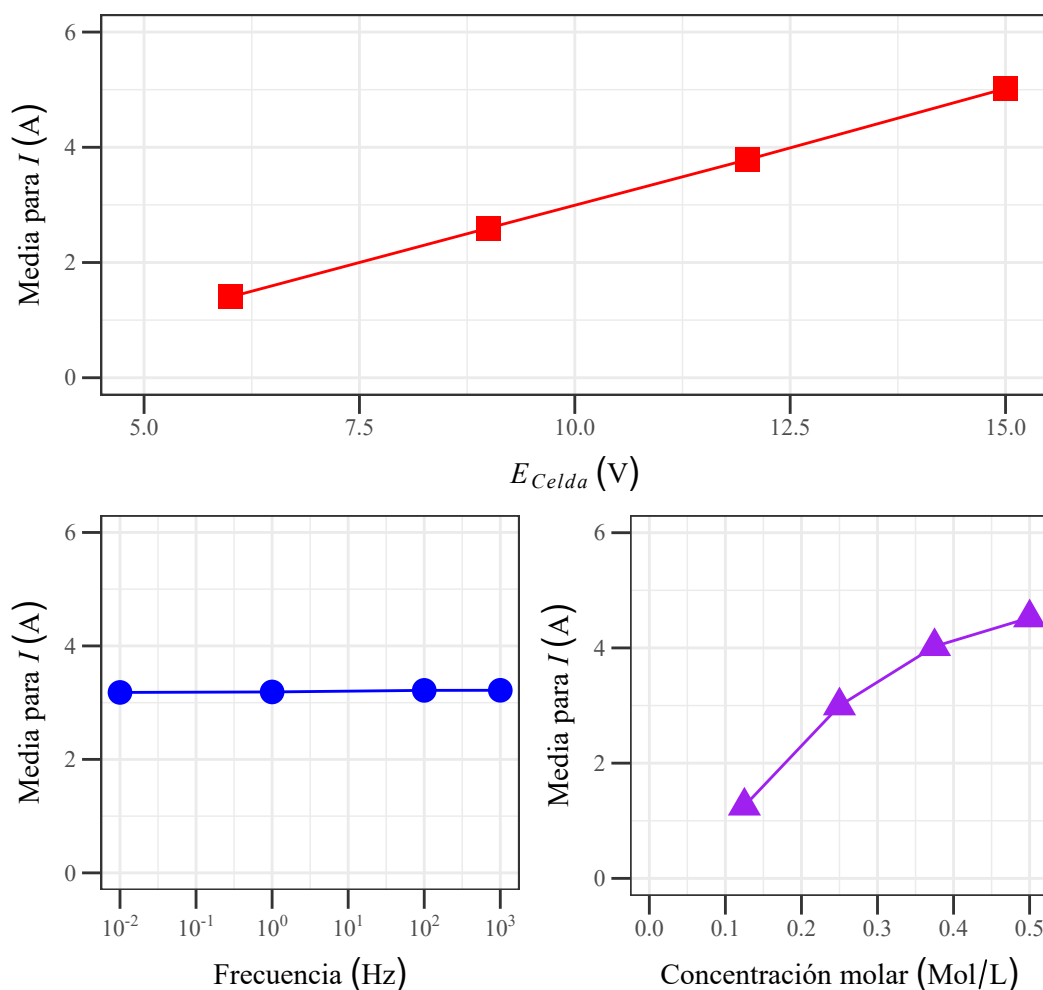


Figura 4.6: Efectos principales para flujo corriente eléctrica.

4.2.3. Efectos principales para costo eléctrico por unidad de kilogramo de hidrógeno

En la Figura 4.7 se presenta el efecto de las variables dependientes (voltaje, frecuencia y molaridad) sobre la variable de respuesta de costo de producción por unidad de kilogramo de hidrógeno. El costo de producción depende de las tres variables involucradas. El efecto del voltaje es muy superior comparado con los efectos producidos por frecuencia y molaridad. De acuerdo a las tres respuestas se puede concluir un costo mínimo, de producción a un voltaje de 6.0 V, frecuencia de 1.0 Hz y concentración de 0.5 M. El costo mínimo de producción no conlleva a la máxima producción de hidrógeno por unidad de tiempo. La razón de producción de hidrógeno en la condición con costo mínimo corresponde a 0.143 mL/s con una inversión energética de 153.47

Kw-h/kg. La ventaja de involucrar el aspecto económico como variable de salida es la identificación de la influencia de todas las variables involucradas en el experimento. En este caso se logra integrar todas las influencias y llegar a conclusiones más contundentes al considerar la variable económica como respuesta.

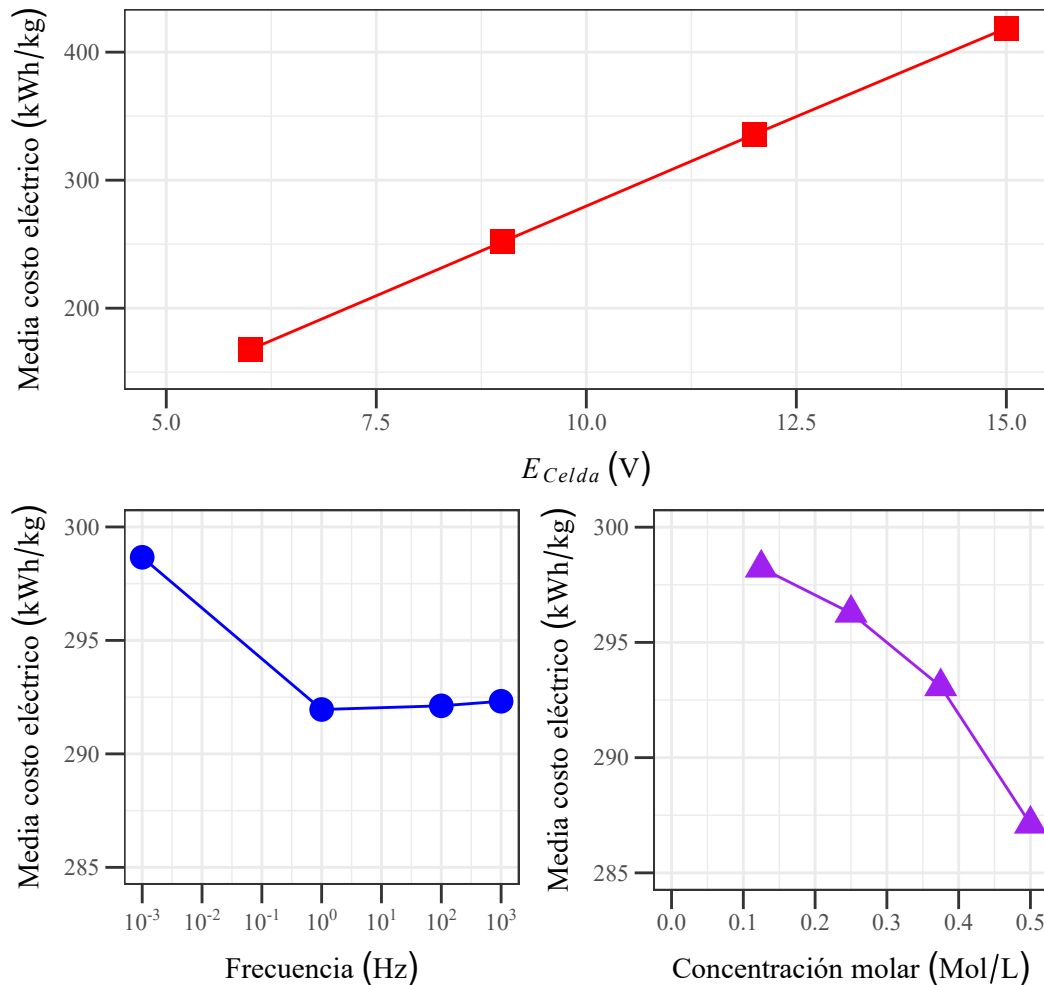


Figura 4.7: Efectos principales para el costo eléctrico por unidad de kilogramo.

4.2.4. Grafica de efectos principales para eficiencia beta

En la Figura 4.8 se muestran los efectos principales de las variables (voltaje, frecuencia y concentración) sobre el parámetro de desempeño. El parámetro de desempeño relaciona la energía interna producida entre la energía eléctrica invertida. Con el parámetro de desempeño se logra identificar la participación de las tres variables independientes. La celda electrolítica es más efectiva para bajos voltajes con frecuencias

en el rango de 1.0 a 100 Hz y una elevada concentración. Conjuntando las tres respuestas se llega al punto de mayor desempeño de: voltaje de 6.0 V, 1.0 Hz y 0.5 M. En este caso se desea obtener el máximo valor de desempeño de la celda que corresponde con el mínimo valor de costo de producción de hidrógeno.

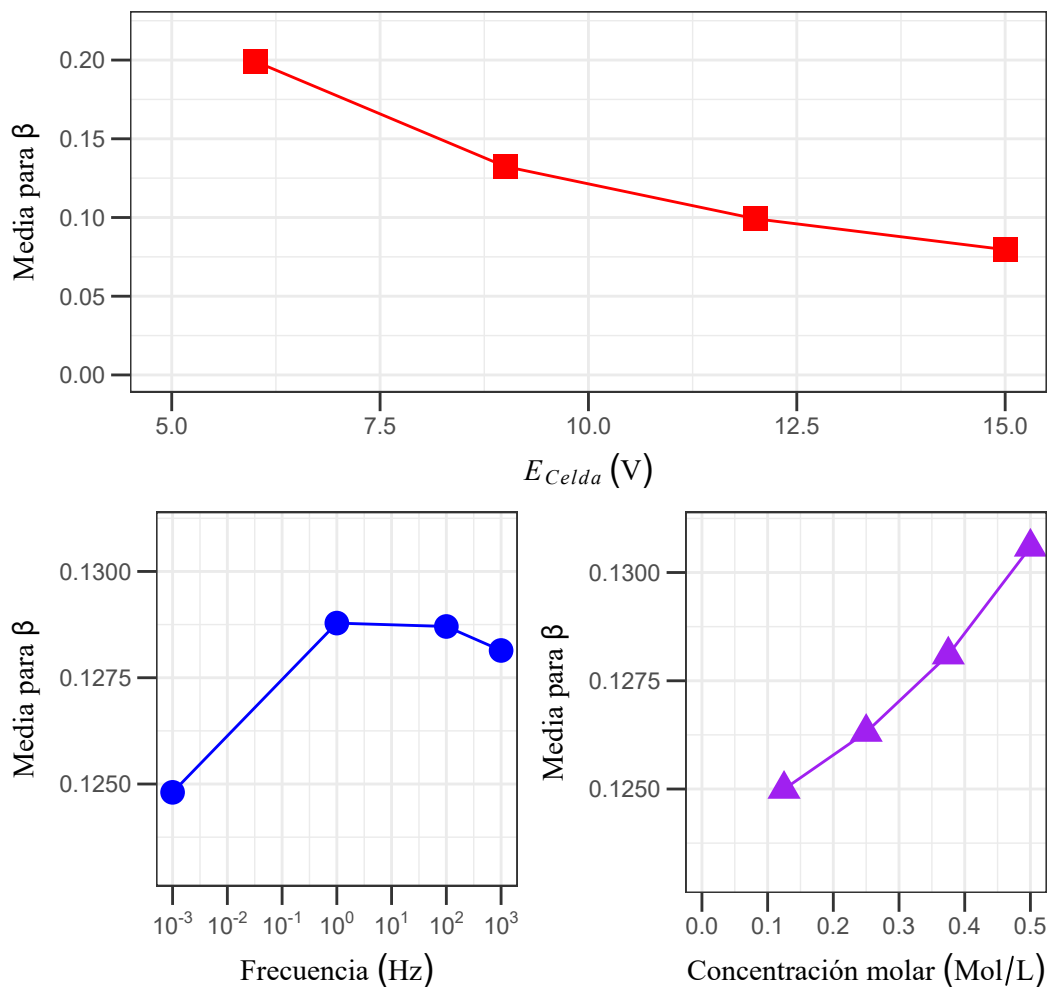


Figura 4.8: Efectos principales para eficiencia beta.

4.3. Experimentos con electrodo de hidróxido de níquel

Una alternativa mas en el desempeño de la generación de hidrógeno discutida en la subdirección 2.1.7.2 es la introducción de un tercer electrodo de hidróxido de níquel. Dicha propuesta se expone en la investigación de [40]. Los retos a vencer es la gene-

ración de un electrodo sólido de dicha sustancia. El hidróxido de níquel se encuentra en el mercado en forma polvo.

4.3.1. Desarrollo de electrodo de hidróxido de níquel

En este trabajo se reportan cuatro métodos para generar un electrodo de hidróxido de níquel. Las respuestas fueron no satisfactorias y esto ayuda a reducir el campo de búsqueda para futuras investigaciones. Los principales problemas a vencer son:

- Erosión del material.
- Reacciones indebidas en el electrodo mediante difusión de energía.
- Incremento en la resistencia eléctrica del electrodo.

Los métodos incluyen un método propuesto en un artículo científico con resultados no favorables. El resto de las propuestas fueron generadas por iniciativa propia en esta investigación. Se recomienda incrementar la búsqueda en el campo de las disoluciones.

En este trabajo de investigación se utilizó el hidróxido de níquel-II del tipo β de la marca Sigma-Aldrich.

4.3.1.1. Fabricación del electrodo mediante compactación

Una de las opciones que se realizó en esta investigación fue la compactación del polvo mediante la presión mecánica, para tal fin se desarrolló un molde de compactado en acero 1018 con la finalidad de generar un electrodo de 100.0 mm de largo x 10.0 mm de diámetro. El método de compactado se basa en el principio de cilindro pistón. La presión mecánica se llevó a cabo mediante una prensa tornillo. El cilindro contiene un diámetro interior de 10.0 mm x 130.0 mm de carrera, bajo este sistema se logró un grado de compactación de 46.0 %. En la Figura 4.9 se muestra el cilindro con el electrodo compactado.

Las pruebas que se obtuvieron con el compactado mecánico del polvo, se observa que a pesar del alto nivel del compactado el electrodo finalmente se desvanece después de permanecer 5 segundos inmersos en el electrolito.



Figura 4.9: Electrodo de hidróxido de níquel por compresión.

4.3.1.2. Fabricación del electrodo mediante un contenedor

Basados en la respuesta del método del compactado se concluye que evitar lidiar con la fuerza gravitatoria y trabajar el confinamiento mediante un recipiente, se propuso realizar el electrodo ubicándolo en la base de la celda. El confinamiento se realizó con un recipiente no reactivo al proceso electrolítico. Se aplicó un compactado mediante apisonamiento del polvo. La difusión de la energía se realizó energizando una superficie de níquel-cobre (moneda de 50.0 pesos mexicanos de 1982) en la base del recipiente.

La propuesta funciona muy bien durante los primeros 2 minutos, posterior a ello, el electrolito penetra alcanzando la base de níquel reaccionando y produciendo gas. El gas producido desplaza el polvo del recipiente contenedor. En la Figura 4.10 se muestra la propuesta del recipiente contenedor.



Figura 4.10: Contenedor con base de níquel.

4.3.1.3. Fabricación del electrodo mediante una mezcla

La alternativa del uso de una amalgama fue propuesta por [40]. El electrodo se fabrica mezclando un 20.0 % de politetrafluoroetileno (teflón), 70.0 % de hidróxido de níquel y un 10.0 % de negro de carbón. Los elementos se encuentran en una base másica y la mezcla se apoya con agua destilada para conseguir una pasta y dar forma al electrodo.

El electrodo fue construido considerando una geometría de 1.3 cm de diámetro y 8 cm de largo. La forma cilíndrica se obtuvo por extrusión mediante el uso de una jeringa. La difusión de energía fue mediante la inclusión de una punta de grafito(2 mm de diámetro) a un extremo del electrodo de hidróxido de níquel (Figura 4.11).

Los resultados mediante el método descrito funcionan para los primeros 30 segundos. La problemática presentada se relaciona directamente con la sedimentación del material cuando se rebasan los 30 segundos, se realizaron mas pruebas incrementando la proporción del politetrafluoroetileno eliminando así el desprendimiento. La desventaja de agregar más unificante produce un incremento de la resistencia eléctrica y

entorpece el proceso electrolítico. El fenómeno del incremento en la resistividad se identificó al observar una generación de calor en el electrodo durante la operación. En este caso se aplicó un voltaje de 30.0 V para apenas alcanzar a producir niveles bajos de hidrógeno.



Figura 4.11: Electrodo hidróxido de níquel-teflón.

4.3.1.4. Fabricación del electrodo mediante disolución

El método de disolver el hidróxido de níquel se lleva a cabo mediante el uso de un ácido débil. El ácido acético es seleccionado como primera opción. La reacción de la disolución se encuentra expresada en la Ecuación 4.1.



En esta reacción el protón H^+ del ácido acético reacciona con la molécula de OH^- del Ni(OH)_2 formando agua y dando lugar a que se liberen iones de Ni^{+2} como productos de la reacción. El objetivo de esta reacción es disolver parcialmente el Ni(OH)_2 para

formar una masa semisólida que posteriormente al secar, se obtenga el electrodo de $\text{Ni}(\text{OH})_2$.

Esta opción resultó ser la más satisfactoria, no se precipitó en la celda, y logró conducir electricidad. Por lo tanto, se rediseñó la celda neumática para poder montar los 3 electrodos. En la Figura 4.12 se muestra la celda con los 3 electrodos montados.

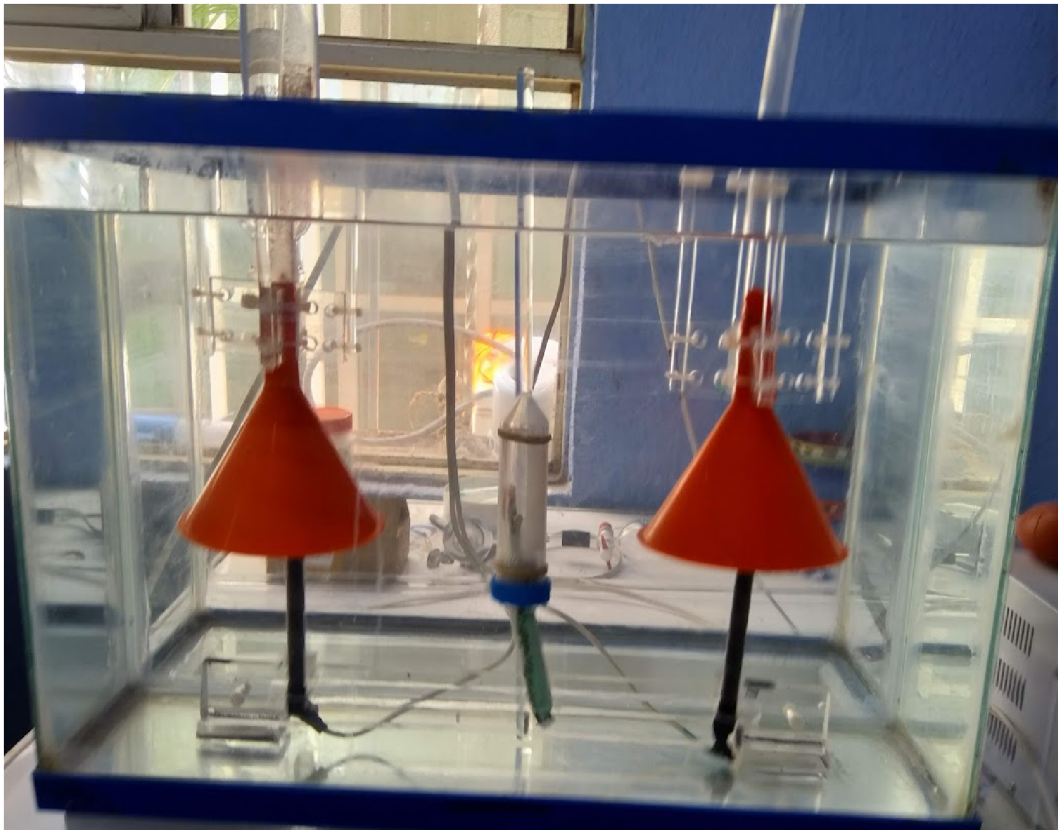


Figura 4.12: Celda de electrólisis con 3 electrodos montados.

El electrodo mediante disolución logró mantener su forma por 5.0 minutos sumergido en el agua, resultó ser conductor. Sin embargo, en comparación con el electrodo de grafito a mismos voltajes presentó un flujo de corriente 4 veces menor.

Conclusiones

Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se estudió experimentalmente la producción de hidrógeno como función de los parámetros eléctricos. En la evaluación energética de la celda fue necesario el desarrollo de un sistema robusto de adquisición de datos. Los indicadores tradicionales de eficiencia no involucran todas las variables en el fenómeno físico. Por lo tanto, es difícil determinar puntos de operación óptimos mediante eficiencia de Faraday y eficiencia de segunda ley.

La celda electrolítica puede ser estudiada mediante las variables de salida de flujo volumétrico, corriente eléctrica, parámetro de desempeño y el indicador de costo de producción de hidrógeno.

Los resultados indican una mayor influencia del voltaje y concentración sobre las variables de respuesta. En el caso del flujo volumétrico se encuentra afectado principalmente por el voltaje, seguido de la concentración y finalmente la frecuencia, únicamente en el rango de 0.0 a 1.0 Hz.

Por su parte, la variable respuesta de corriente eléctrica se encuentra relacionada únicamente por el voltaje y la concentración. El efecto de la frecuencia no figura en la respuesta por corriente.

En el caso del parámetro de desempeño logra interaccionar con las tres variables (voltaje, frecuencia y concentración). Del resultado de efectos principales se logra determinar un máximo en 6.0 V, 1.0 Hz y 0.5 M. El punto de máximo desempeño define un punto operativo, en la producción de hidrógeno, considerando el dominio experimental.

El indicador económico sugiere que se tiene influencia en las tres variables, en este caso se busca un mínimo costo de producción de hidrógeno. El mínimo costo también corresponde al punto de 6.0 V, 1.0 Hz y 0.5 M lo cual es coherente y corresponde con el punto máximo de desempeño.

Dependiendo del nivel de voltaje utilizado, existen puntos operativos de máximo desempeño. La tendencia de operar con mejor desempeño obedece a la definición de la eficiencia termodinámica de la celda. La producción de hidrógeno puede ser optimizada en base al flujo volumétrico requerido. Existen puntos de igual desempeño siendo diferenciados la producción de hidrógeno. Estableciendo una tarifa eléctrica de 1.0 \$ (MXN) por cada kWh el costo por producción de hidrógeno es de 153.47 \$/kg de hidrógeno.

Asimismo, se encontró que la respuesta de la concentración conduce a la existencia de una concentración crítica para la producción de hidrógeno mediante la electrólisis. Las tasas de producción de hidrógeno reportadas en este trabajo, son superiores a las tasas de producción que se han generado en estudios previos. Es posible señalar que la diferencia radica en el nivel de interferencia entre los recipientes de separación con el campo eléctrico. Se encontró que los electrodos a base de carbono resultan adecuados debido a su bajo costo, buena conductividad eléctrica y térmica, la propiedad relativamente inerte en solución alcalina en comparación con los metales y también por su estructura porosa con alta pureza.

Trabajo a futuro

Como propuesta de trabajo a futuro se recomienda el estudio del diseño y fabricación del tercer electrodo mediante las disoluciones, el reto a vencer es conseguir la unificación del polvo de hidróxido de níquel mediante disoluciones débiles con el mínimo incremento de resistencia eléctrica. Una vez fabricado el tercer electrodo, se recomienda realizar un estudio con el objetivo de determinar el desempeño en la producción de hidrógeno.

Apéndice A

Matriz de experimentación.

A.1. Matriz de experimentación

Corrida	Replica	A	B	C	Corrida	Replica	A	B	C	Corrida	Replica	A	B	C	Corrida	Replica	A	B	C
1	1	1	2	3	49	1	2	3	2	97	1	3	3	3	145	1	4	4	2
2	1	1	4	1	50	1	2	1	2	98	1	3	1	1	146	1	4	3	2
3	1	1	2	4	51	1	2	3	4	99	1	3	2	2	147	1	4	1	1
4	1	1	1	1	52	1	2	1	1	100	1	3	1	3	148	1	4	2	1
5	1	1	1	4	53	1	2	1	4	101	1	3	4	3	149	1	4	1	4
6	1	1	3	4	54	1	2	4	2	102	1	3	2	1	150	1	4	3	4
7	1	1	3	2	55	1	2	1	3	103	1	3	1	2	151	1	4	3	3
8	1	1	4	2	56	1	2	2	2	104	1	3	3	1	152	1	4	4	1
9	1	1	4	3	57	1	2	2	3	105	1	3	2	4	153	1	4	2	4
10	1	1	1	2	58	1	2	2	4	106	1	3	4	2	154	1	4	1	3
11	1	1	4	4	59	1	2	2	1	107	1	3	2	3	155	1	4	2	2
12	1	1	3	3	60	1	2	3	3	108	1	3	4	1	156	1	4	2	3
13	1	1	2	1	61	1	2	4	4	109	1	3	1	4	157	1	4	4	3
14	1	1	2	2	62	1	2	4	1	110	1	3	3	4	158	1	4	1	2
15	1	1	3	1	63	1	2	3	1	111	1	3	3	2	159	1	4	4	4
16	1	1	1	3	64	1	2	4	3	112	1	3	4	4	160	1	4	3	1
17	2	1	3	2	65	2	2	2	3	113	2	3	4	4	161	2	4	2	1
18	2	1	2	3	66	2	2	2	1	114	2	3	2	2	162	2	4	2	4
19	2	1	1	3	67	2	2	3	3	115	2	3	3	3	163	2	4	3	3
20	2	1	1	4	68	2	2	2	4	116	2	3	4	2	164	2	4	3	2
21	2	1	4	1	69	2	2	2	2	117	2	3	3	4	165	2	4	1	4
22	2	1	4	4	70	2	2	1	4	118	2	3	1	1	166	2	4	3	1
23	2	1	3	4	71	2	2	4	3	119	2	3	4	3	167	2	4	4	4
24	2	1	3	3	72	2	2	4	2	120	2	3	2	4	168	2	4	4	3
25	2	1	4	2	73	2	2	4	4	121	2	3	3	2	169	2	4	4	2
26	2	1	2	1	74	2	2	3	4	122	2	3	1	2	170	2	4	2	3
27	2	1	1	2	75	2	2	1	3	123	2	3	3	1	171	2	4	2	2
28	2	1	1	1	76	2	2	4	1	124	2	3	4	1	172	2	4	3	4
29	2	1	3	1	77	2	2	3	2	125	2	3	2	1	173	2	4	1	3
30	2	1	2	4	78	2	2	1	1	126	2	3	1	3	174	2	4	1	1
31	2	1	4	3	79	2	2	1	2	127	2	3	1	4	175	2	4	4	1
32	2	1	2	2	80	2	2	3	1	128	2	3	2	3	176	2	4	1	2
33	3	1	4	1	81	3	2	4	2	129	3	3	2	3	177	3	4	2	1
34	3	1	1	3	82	3	2	1	3	130	3	3	3	3	178	3	4	1	4
35	3	1	4	4	83	3	2	1	1	131	3	3	1	1	179	3	4	3	1
36	3	1	2	2	84	3	2	1	4	132	3	3	1	3	180	3	4	2	4
37	3	1	4	3	85	3	2	4	3	133	3	3	4	1	181	3	4	1	1
38	3	1	3	3	86	3	2	3	1	134	3	3	2	2	182	3	4	4	4
39	3	1	2	1	87	3	2	2	1	135	3	3	4	2	183	3	4	1	3
40	3	1	2	3	88	3	2	2	2	136	3	3	4	3	184	3	4	4	1
41	3	1	3	4	89	3	2	4	1	137	3	3	2	1	185	3	4	4	2
42	3	1	1	4	90	3	2	3	4	138	3	3	3	1	186	3	4	3	2
43	3	1	1	2	91	3	2	3	2	139	3	3	4	4	187	3	4	3	3
44	3	1	3	2	92	3	2	2	4	140	3	3	1	4	188	3	4	3	4
45	3	1	3	1	93	3	2	4	4	141	3	3	3	2	189	3	4	4	3
46	3	1	1	1	94	3	2	1	2	142	3	3	1	2	190	3	4	3	2
47	3	1	2	4	95	3	2	3	3	143	3	3	3	4	191	3	4	1	2
48	3	1	4	2	96	3	2	2	3	144	3	3	2	4	192	3	4	2	3

(a) Concentración 0.125 M (b) Concentración 0.250 M (c) Concentración 0.375 M (d) Concentración 0.500 M

Table 1: Tabla de diseño aleatorizada

Referencias

- [1] Muhammad Arif Khan, Hongbin Zhao, Wenwen Zou, Zhe Chen, Wenjuan Cao, Jianhui Fang, Jiaqiang Xu, Lei Zhang, and Jiujun Zhang. Recent progresses in electrocatalysts for water electrolysis. *Electrochemical Energy Reviews*, 1:483–530, 2018.
- [2] Esa Pursiheimo, Hannele Holttinen, and Tiina Koljonen. Inter-sectoral effects of high renewable energy share in global energy system. *Renewable Energy*, 136:1119–1129, 6 2019.
- [3] Espen Flo Bodal, Dharik Mallapragada, Audun Botterud, and Magnus Korpas. Decarbonization synergies from joint planning of electricity and hydrogen production: A texas case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45:32899–32915, 11 2020.
- [4] Luca Bertuccioli, Alvin Chan, David Hart, Franz Lehner, and Ben Madden. Study on development of water electrolysis in the eu final report, 2 2014.
- [5] Gerda Gahleitner. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38:2039–2061, 2 2013.
- [6] Alexa Grimm, Wouter A. de Jong, and Gert Jan Kramer. Renewable hydrogen production: A techno-economic comparison of photoelectrochemical cells and photovoltaic-electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45:22545–22555, 9 2020.
- [7] Kai Zeng and Dongke Zhang. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36:307–326, 6 2010.

-
- [8] G. Maggio, A. Nicita, and G. Squadrito. How the hydrogen production from res could change energy and fuel markets: A review of recent literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44:11371–11384, 5 2019.
- [9] J. Milliken. Hydrogen, fuel cells and infrastructure technologies program: Multiyear research, development and demonstration plan, 10 2007.
- [10] John Turner, George Sverdrup, Margaret K Mann, Pin-Ching Maness, Ben Kroposki, Maria Ghirardi, Robert J Evans, and Dan Blake. Renewable hydrogen production. *International Journal of Energy Research*, 32:379–407, 4 2008. <https://doi.org/10.1002/er.1372>.
- [11] Daojin Zhou, Pengsong Li, Wenwen Xu, Sana Jawaaid, Jamesh Mohammed-Ibrahim, Wen Liu, Yun Kuang, and Xiaoming Sun. Recent advances in non-precious metal-based electrodes for alkaline water electrolysis. *ChemNanoMat*, 6:336–355, 3 2020. <https://doi.org/10.1002/cnma.202000010>.
- [12] M. De Simón-Martín, B. Cortes-Nava, R. Rodriguez-Parra, and F. Carro-De Lorenzo. The role of green hydrogen in the energy transitio... - dyna journal engineering. *DYNA*, 96:200–206, 2021.
- [13] OCDE. Oecd total energy supply by source, 1971-2020.charts,data and statistics.iea, 8 2021.
- [14] Carl Friedrich Schleussner, Joeri Rogelj, Michiel Schaeffer, Tabea Lissner, Rachel Licker, Erich M. Fischer, Reto Knutti, Anders Levermann, Katja Frieler, and William Hare. Science and policy characteristics of the paris agreement temperature goal. *Nature Climate Change 2016 6:9*, 6:827–835, 7 2016.
- [15] Global Monitoring Laboratory. Trends in atmospheric carbon dioxide, 3 2022.
- [16] Zainul Abdin, Ali Zafaranloo, Ahmad Rafiee, Walter Mérida, Wojciech Lipiński, and Kaveh R. Khalilpour. Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120:109620, 3 2020.
- [17] Dimitrios Apostolou and Peter Enevoldsen. The past, present and potential of hydrogen as a multifunctional storage application for wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112:917–929, 9 2019.
- [18] Ulf Bossel. Does a hydrogen economy make sense? *Proceedings of the IEEE*, 94(10):1826–1837, 2006.

-
- [19] Drennen T, A Baker, W Kamery Electricity, and Generation Costs. Pathways to a hydrogen future. *Renewable Energy*, pages 10337–10337, 2006.
- [20] Martin Wietschel and Michael Ball. *The hydrogen economy: Opportunities and challenges*. 01 2009.
- [21] J.R. polanco. Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción, 2018.
- [22] S. Shiva Kumar and V. Himabindu. Hydrogen production by pem water electrolysis. *Materials Science for Energy Technologies*, 2:442–454, 12 2019.
- [23] Fatima ezzahra Chakik, Mohammed Kaddami, and Mohammed Mikou. Effect of operating parameters on hydrogen production by electrolysis of water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40):25550–25557, 2017.
- [24] Naohiro Shimizu, Souzaburo Hotta, Takayuki Sekiya, and Osamu Oda. A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short-pulse power supply. *Journal of applied electrochemistry*, 36(4):419–423, 2006.
- [25] CH Dharmaraj and S AdishKumar. Economical hydrogen production by electrolysis using nano pulsed dc. *Journal homepage: www. IJEE. IEEEFoundation.org*, 3(1):129–136, 2012.
- [26] Dhafer Manea H Al-Hasnawi. Experimental study of wave shape and frequency of the power supply on the energy efficiency of hydrogen production by water electrolysis. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, 4:12239–12250, 2015.
- [27] A L Yuvaraj and Santhanaraj Daniel. A systematic study on electrolytic production of hydrogen gas by using graphite as electrode. *Materials Research*, 17:83–87, 2 2014.
- [28] SPS Badwal, S Giddey, and FT Ciacchi. Hydrogen and oxygen generation with polymer electrolyte membrane (pem)-based electrolytic technology. *Ionics*, 12(1):7–14, 2006.
- [29] Alejandro N Colli, Hubert H Girault, and Alberto Battistel. Non-precious electrodes for practical alkaline water electrolysis. *Materials*, 12(8):1336, 2019.
- [30] Pino Priego A. and Arcos Vargas A. Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica el caso de la producción de hidrógeno : proyecto fin de carrera, 2009.

-
- [31] Peter William Atkins and Julio De Paula. *Atkins Química Física*. Number 544 ATK. Editorial Médica Panamericana, 2008.
- [32] Alfredo Ursua, Luis M Gandia, and Pablo Sanchis. Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 100:410–426, 2012.
- [33] Doug Knigge, Pushwinder Kaur, and Greg Swain. Recent trends in chemically modified sp² and sp³ bonded carbon electrodes, 8 2007.
- [34] Keith. Scott. *Electrochemical Methods for Hydrogen Production*. The Royal Society of Chemistry, 2020.
- [35] Chengxiang Xiang, Kimberly M Papadantonakis, and Nathan S Lewis. Principles and implementations of electrolysis systems for water splitting. *Mater. Horiz.*, 3:169–173, 2016.
- [36] Youssef Naimi and Amal Antar. Hydrogen generation by water electrolysis, 2018.
- [37] Teresa Enríquez de la Fuente. El papel del hidrógeno en la transición energética: análisis y prospectiva. *Fundación Renovables*, 1:1–147, 1 2019.
- [38] Fatih Birol. The future of hydrogen,analysis.iea, 6 2019.
- [39] Greig Chisholm and Leroy Cronin. Hydrogen from water electrolysis. *Storing Energy: With Special Reference to Renewable Energy Sources*, pages 315–343, 1 2016.
- [40] Long Chen, Xiaoli Dong, Yonggang Wang, and Yongyao Xia. Separating hydrogen and oxygen evolution in alkaline water electrolysis using nickel hydroxide. *Nature Communications 2016 7:1*, 7:1–8, 5 2016.
- [41] Tsuneo Hijikata. Research and development of international clean energy network using hydrogen energy (we-net). *International Journal of Hydrogen Energy*, 27:115–129, 8 2002.
- [42] V. Utgikar and T. Thiesen. Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31:939–944, 6 2006.

-
- [43] Xiaoxia Yan, Rida Javed, Yanmei Gong, Daixin Ye, and Hongbin Zhao. Fundamentals of water electrolysis. *Electrochemical Water Electrolysis*, pages 1–26, 4 2020.
- [44] Zhifei Yan, Jeremy L Hitt, John A Turner, and Thomas E Mallouk. Renewable electricity storage using electrolysis. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 117:12558–12563, 6 2020.
- [45] Stanley Santos, Guido Collodi, Giuliana Azzaro, and Noemi Ferrari. Techno-economic evaluation of smr based standalone (merchant) plant with ccs, 8 2017.
- [46] Agata Godula-Jopek. Hydrogen storage options including constraints and challenges, 2015.
- [47] C. N. Kowthaman, P. Senthil Kumar, and V. Arul Mozhi Selvan. Micro-patterned graphite electrodes: An analysis and optimization of process parameters on hydrogen evolution in water electrolysis. *Fuel*, 305, 12 2021.
- [48] F E Chakik, M Kaddami, and M Mikou. Optimization of physico-chemical parameters of hydrogen production by electrolysis of water. pages 1–6, 2018.