



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

Facultad Regional Multidisciplinaria, FAREM-Estelí

**Diseño y evaluación experimental de un sistema de electrólisis alcalina
para la generación de hidrógeno**

Trabajo monográfico para optar
al grado de

Ingeniero en Energías Renovables

Autores

Osmar Josué Aguilera Flores

Arath Joshua Sánchez González

Tutor:

Dr. Juan Alberto Betanco Maradiaga

Estelí, 2 de marzo de 2022



Dedicatoria

A Dios, por darnos la motivación y la sabiduría para culminar nuestros estudios y nuestro trabajo monográfico, por darnos la fuerza e iluminarnos en los momentos de incertidumbre y por ser nuestro sustento en todo momento.

A nuestros padres, porque gracias a ellos hemos llegado hasta acá. Por inculcarnos valores y principios y por motivarnos a salir adelante. Por su apoyo y amor incondicional que agradeceremos por siempre.

Agradecimientos

Agradecemos a las personas que confiaron en nosotros y en nuestra investigación, quienes a pesar de las limitaciones y desafíos nos motivaron a seguir adelante. A nuestros amigos y familiares, quienes de una u otra forma aportaron su grano de arena para hacer posible este logro.

A nuestro tutor, el Dr. Juan Betanco, por apoyarnos en nuestro trabajo y aportarnos sus conocimientos y experiencia en la calidad de la investigación científica.

Al Ing. Larry Quintero, quien tuvo un papel importante en el desarrollo del prototipo, brindándonos su apoyo en el modelado del mismo.

A nuestra alma mater, por facilitarnos las herramientas y los medios para poder realizar nuestro trabajo monográfico y desarrollar nuestro aprendizaje con excelencia a lo largo de la carrera.



FACULTAD REGIONAL MULTIDISCIPLINARIA DE ESTELI

FAREM-ESTELI

2022: "Vamos por más victorias educativas"

Estelí, 23 de agosto 2022

CONSTANCIA

La Monografía es el resultado de un proceso académico investigativo llevado a cabo por estudiantes como forma de culminación de estudios. El propósito es resolver un problema vinculando la teoría con la práctica, potenciando las capacidades, habilidades y destrezas investigativas, y contribuye a la formación del profesional que demanda el desarrollo económico, político y social del país. (Art.13 del reglamento de régimen académico estudiantil. Modalidades de graduación)

Por tanto, hago constar que el trabajo **Diseño y evaluación experimental de un sistema de electrólisis alcalina para la generación de hidrógeno**, cumple con los requisitos académicos requeridos para una Monografía, y ha sido presentado, defendido y corregido a satisfacción del tutor, con lo cual está optando al título de **Ingeniero en Energías Renovables**.

Los autores de este estudio son los bachilleres Osmar Josué Aguilera Flores y Arath Joshua Sánchez González; quienes, durante la ejecución de esta investigación, demostraron responsabilidad, ética y conocimiento sobre la temática.

Así mismo, este estudio aporta experimentación con diferentes tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis, permitiendo su comparación técnicas de los principales parámetros, por tanto, será de mucha utilidad para las energías renovables, la comunidad estudiantil y las personas interesadas en esta temática.

Atentamente,

Dr. Juan Alberto Betanco Maradiaga
Orcid <https://orcid.org/0000-0001-8838-8588>
FAREM ESTELI UNAN MANAGUA

Cc/Archivo

Resumen

La presente investigación tuvo como propósito diseñar y evaluar un sistema de electrolisis alcalina para la generación de hidrógeno. Se realizó un estudio de tipo experimental, exploratorio, descriptivo y correlacional. Para el diseño y la caracterización del sistema se determinaron los materiales a usar, las dimensiones de las piezas y su función, se elaboraron planos y modelos 3D, así como representaciones esquemáticas los cuales permitieron definir con exactitud el mismo y describir el funcionamiento de cada elemento. Seguido al diseño y su construcción, se efectuó una evaluación de los parámetros que intervienen en la electrolisis de la celda, manipulando las variables independientes *tensión* y *sustancia empleada*, determinándose correlaciones (Pearson) entre las principales variables. Se realizaron también análisis causa-efecto, mediante el ANOVA y la prueba LSD de Fisher. Con el ANACORR se encontraron fuertes correlaciones entre la corriente y el caudal (0.97), entre temperatura y corriente (0.97) y entre temperatura y caudal (0.62). El ANOVA, ANCOVA y el LSD de Fisher permitieron determinar los efectos de las diferentes disoluciones usadas como electrolito en las variables respuesta de interés, especialmente en la variable eficiencia. De estas pruebas se permitió deducir que *se obtuvo una mayor eficiencia empleando una disolución de hidróxido de sodio al 15% masa-volumen*. Mediante el análisis de regresión no lineal se realizó ajuste de curvas *tensión – corriente*, el resultado fue que para todos los tratamientos los datos se ajustan a un modelo exponencial con un alto coeficiente de determinación R^2 . Gracias al análisis de regresión lineal para *caudal – corriente* y *corriente – temperatura* se pudieron obtener los parámetros de la ecuación de la recta de regresión para cada tratamiento con un buen ajuste. Mediante el análisis termodinámico y eléctrico de los datos obtenidos con la experimentación se determinó que la eficiencia máxima de la electrolisis fue del 63%. Finalmente se realizó una tabla comparativa entre las diferentes tecnologías de electrolisis para la producción de hidrógeno la cual permitió contrastar los resultados obtenidos en esta investigación y los encontrados en bibliografía.

Palabras clave: Electrolisis alcalina, hidrógeno, energías renovables

Abstract

The purpose of this research was to design and evaluate an alkaline electrolysis system for hydrogen generation. An experimental, exploratory, descriptive and correlational study was carried out. For the design and characterization of the system, the materials to be used, the dimensions of the parts and their function were determined, plans and 3D models were drawn up, as well schematic representations of which made it possible accurately define the system and describe the operation of each element. Following the design and its construction, an evaluation of the parameters involved in the electrolysis of the cell was carried out, manipulating the independent variables *voltage* and *substance used*, determining correlations (Pearson) between the main variables. Cause-effect analyses were also performed using ANOVA and Fisher's LSD test. With ANACORR, strong correlations were found between current and flow rate (0.97), between temperature and current (0.97) and between temperature and flow rate (0.62). ANOVA, ANCOVA and Fisher's LSD allowed determining the effects of the different solutions used as electrolyte on the response variables of interest, especially on the efficiency variable. From these tests it was possible to deduce that *a higher efficiency was obtained using a 15% mass-volume sodium hydroxide solution*. The non-linear regression analysis was used to adjust the *voltage-current* curves, and the result was that for all treatments the data fit an exponential model with a high coefficient of determination R². Thanks to the linear regression analysis for *flow - current and current - temperature*, it was possible to obtain the parameters of the regression line equation for each treatment with a good fit. Through the thermodynamic and electrical analysis of the data obtained from the experiment, it was determined that the maximum efficiency of the electrolysis was 63%. Finally, a comparative table was made between the different electrolysis technologies for hydrogen production, which allowed contrasting the results obtained in this research with those found in the literature.

Keywords: Alkaline electrolysis, hydrogen, renewable energies

Lista de siglas y acrónimos

ANOVA:	Análisis de varianza
ANCOVA:	Análisis de covarianza
ANACORR:	Análisis de correlación
LSD:	Diferencia mínima significativa
PCS:	Poder calorífico superior
PCI:	Poder calorífico inferior
AEC:	Celda de electrólisis alcalina
PEM:	Membrana de electrolito polimérico
SOEC:	Celda de electrólisis de óxido sólido
DC:	Corriente directa
IUPAC:	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
SMR:	Reformado de metano con vapor
VHTR:	Reactor de muy alta temperatura
DRI:	Hierro de reducción directa
GNC:	Gas natural comprimido
GNL:	Gas natural licuado
CHP:	Cogeneración de electricidad y calor
SOFC:	Pila de combustible de óxido sólido
PAFC:	Pila de combustible de ácido fosfórico
MCFC:	Pila de combustible de carbonatos fundidos
HHO:	Oxihidrógeno

Contenido

Capítulo 1	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.2.1 Caracterización del problema	3
1.2.2 Delimitación del problema	4
1.2.3 Formulación del problema.....	4
1.2.4 Sistematización del problema.....	4
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos.....	6
Capítulo 2	7
2.1 Antecedentes	7
2.2 Marco teórico	8
2.2.1 El hidrógeno	8
2.2.1.1 Propiedades del Hidrógeno.	9
2.2.1.2 Densidad y medidas relacionadas	9
2.2.2 Producción de hidrógeno	14
2.2.2.1 Obtención a partir de combustibles fósiles	14
2.2.2.2 Obtención a partir de electrólisis del agua	17
2.2.2.3 Obtención fotobiológica.....	21
2.2.2.4 Obtención por descomposición a alta temperatura	21
2.2.2.5 Obtención a partir de biomasa.....	22
2.2.2.6 Desplazamiento hidrógeno desde los ácidos con los metales	25
2.2.2.7 Reformado de etanol y azúcares.....	25
2.2.3 Almacenamiento de hidrógeno.....	26

2.2.3.1	Hidrógeno gaseoso	26
2.2.3.2	Microesferas de cristal	26
2.2.3.3	Hidrógeno líquido	27
2.2.3.4	Hidruros recargables	28
2.2.3.5	Hidrógeno sólido	31
2.2.3.6	Almacenamiento en sistemas porosos	31
2.2.4	Economía del Hidrogeno	32
2.2.5	Limitaciones del hidrogeno	32
2.2.6	Aprovechamiento del hidrógeno	33
2.2.6.1	Materia prima	33
2.2.6.2	Refinerías	33
2.2.6.3	Metalurgia	34
2.2.6.4	Metanol.....	34
2.2.6.5	Hidrocarburos sintéticos.....	35
2.2.6.6	Productos químicos	35
2.2.6.7	Polímeros.....	36
2.2.6.8	Transporte y movilidad	36
2.2.6.9	Transporte ferroviario	36
2.2.6.10	Generación de calor.....	37
2.2.7	Electrólisis	38
2.2.7.1	Leyes de la electrólisis	38
2.3	Hipótesis	40
Capítulo 3	41
3.1	Diseño metodológico	41

3.1.1	Tipo de estudio	41
3.1.2	Área de estudio	42
3.1.3	Área de conocimiento.....	42
3.1.4	Universo y muestra.....	42
3.1.5	Matriz de operacionalización de variables	44
3.1.6	Métodos, técnicas e instrumentos de recopilación de datos e información....	45
3.1.7	Procedimientos para la recolección de datos e información.....	46
3.1.8	Plan de tabulación y análisis estadístico.....	49
Capítulo 4	50
4.1	Resultados y discusión.....	50
4.1.1	Descripción funcional y constructiva del sistema de electrolisis alcalina.....	50
4.1.1.1	Electrolizador	50
4.1.1.2	Reservorio	51
4.1.1.3	Burbujeador.....	52
4.1.1.4	Configuración del sistema.....	52
4.1.1.5	Materiales	54
4.1.2	Relación entre las variables fisicoquímicas que intervienen en el proceso de electrolisis de la celda.....	55
4.1.2.1	Curvas de polarización de la celda.....	55
4.1.2.2	Serie temporal temperatura-corriente.....	56
4.1.2.1	ANOVA	57
4.1.2.2	Correlaciones.....	61
4.1.2.3	Análisis de regresión.....	64
4.1.3	Cálculo de la eficiencia energética de la celda.....	67

4.1.4 Comparación teórica de las tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis.....	71
Capítulo 5	73
5.1 Conclusiones	73
5.2 Recomendaciones	74
5.3 Bibliografía	75
Anexos	78

Índice de tablas

Tabla 2.1. Propiedades físicas del hidrógeno.	9
Tabla 3.1 Operacionalización de variables.....	44
Tabla 4.1. Lista de materiales.....	54
Tabla 4.2. Analisis de ANCOVA para la variable corriente, con covariable tensión	57
Tabla 4.3. Test: LSD Fisher corriente, covariable tensión Alfa=0.05 DMS=5.53652.....	58
Tabla 4.4. Análisis de covarianza para la variable caudal, covariable tensión.....	58
Tabla 4.5. Test:LSD Fisher Caudal Alfa=0.05 DMS=0.39551	59
Tabla 4.6. Análisis de la varianza para la variable eficiencia.....	59
Tabla 4.7. Test:LSD Fisher para eficiencia Alfa=0.05 DMS=0.17716.....	60
Tabla 4.8. Análisis de la varianza para la variable temperatura	60
Tabla 4.9. Test:LSD Fisher Temperatura; Alfa=0.05 DMS=2.11541	61
Tabla 4.10. Correlación de Pearson tensión corriente	61
Tabla 4.11. Correlación de Pearson Caudal Tensión.....	62
Tabla 4.12. Correlación de Pearson Corriente Caudal	62
Tabla 4.13. Correlación de Pearson Corriente Temperatura	62
Tabla 4.14. Correlación de Pearson Temperatura Caudal	63
Tabla 4.15. Correlación de Pearson Potencia Caudal.....	63
Tabla 4.16. Ecuaciones de regresión Tensión-Corriente	64
Tabla 4.17. Ecuaciones de regresión Caudal-Corriente	65
Tabla 4.18. Tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis	71
Tabla 4.19. Comparación de electrolizador teórico vs experimental de este estudio.....	72

Índice de figuras

Figura 2.1. Relación de expansión de líquido a gas	11
Figura 2.2. Diagrama de fases del hidrógeno	12
Figura 2.3. Volumen específico del hidrógeno en estado gaseoso y líquido.....	13
Figura 2.4. Funcionamiento de un electrolizador alcalino	18
Figura 2.5. Principio de funcionamiento del electrolizador PEM	18
Figura 2.6. Principio de funcionamiento de un electrolizador SOE.....	20
Figura 2.7. Procesos biológicos y termoquímicos	23
Figura 2.8. Almacenamiento de hidrógeno sólido en forma de hidruros metálicos.....	29
Figura 2.9. Vías de producción de compuestos químicos a partir de hidrógeno.....	35
Figura 2.10. Uso residencial de pilas de combustible de hidrógeno en sistemas de cogeneración de electricidad y calor	37
Figura 3.1. Ubicación geográfica ciudad de Estelí.....	42
Figura 3.2 Diseño asistido por computadora del prototipo	46
Figura 3.3 Disposición del prototipo para la realización de pruebas.....	47
Figura 3.4 Preparación del electrolito	48
Figura 4.1. Electrolizador.	50
Figura 4.2. Representación esquemática de las placas	51
Figura 4.3 Burbujeador.....	52
Figura 4.4 Reservorio	52
Figura 4.5. Diagrama de bloques del sistema.....	53
Figura 4.6 Equivalente eléctrico de las placas.....	53
Figura 4.7. Curva de polarización H ₂ O	55
Figura 4.8. Curva de polarización con NaOH a distintas concentraciones	56
Figura 4.9. Serie temporal temperatura - corriente.....	57
Figura 4.10. Ajuste exponencial tensión total vs corriente para cada tratamiento	65
Figura 4.11. Ajustes de regresión lineal caudal vs. corriente	66
Figura 4.12. Gráfica de dispersión con línea de ajuste Corriente vs. Temperatura.....	67
Figura 4.13 Dependencia del voltaje reversible y termoneutro con la temperatura	68
Figura 4.14 Eficiencia de voltaje en función de la densidad de la corriente	69

Figura 4.15 Voltaje parcial aplicado en función de la densidad de corriente..... 70

Índice de anexos

Anexo A- 1. Normalidad de los residuos corriente	78
Anexo A- 2. Independencia de los residuos corriente	78
Anexo A- 3. Normalidad de los residuos caudal	79
Anexo A- 4. Independencia de los residuos caudal	79
Anexo A- 5. Normalidad de los residuos temperatura	80
Anexo A- 6. Independencia de los residuos temperatura	80
Anexo A- 7. Normalidad de los residuos eficiencia.....	81
Anexo A- 8. Independencia de los residuos eficiencia.....	81
Anexo A- 9. Normalidad de los residuos potencia.....	82
Anexo A- 10. Independencia de los residuos potencia.....	82
Anexo A- 11. Homogeneidad de la varianza residuos corriente	83
Anexo A- 12. Homogeneidad de la varianza residuos caudal.....	83
Anexo A- 13. Homogeneidad de la varianza residuos temperatura	83
Anexo A- 14. Homogeneidad de la varianza residuos eficiencia.....	84
Anexo A- 15. Homogeneidad de la varianza residuos potencia.....	84
Anexo B-1. Plano de conjunto: Electrolizador	85
Anexo B-2. Plano de montaje: Electrolizador	86
Anexo B-3. Plano de placas de sujeción.....	87
Anexo B-4. Plano de placas de acero	88
Anexo B-5. Plano de conjunto: Reservorio	89
Anexo B-6. Plano de conjunto: Burbujeador.....	90
Anexo C-1. Instrumento ficha de recolección de datos.....	91

Capítulo 1

1.1 Introducción

Es imperativo que, como sociedad, se establezcan los cambios necesarios en las matrices productivas para poder hacer frente al cambio climático que se vive actualmente. Para esto, es necesario comprender que la emisión de gases de efecto invernadero es el principal factor que contribuye a incrementar los efectos del cambio climático. La producción de energía a partir de combustibles fósiles y quema de carbón genera grandes cantidades de estos gases de efecto invernadero.

Las energías renovables no convencionales (ERNC) son un buen sustituto a las centrales térmicas, ya que se alimentan con energías de costo marginal muy bajo, con una huella de carbono despreciable. Uno de los grandes problemas de las energías renovables como la eólica, solar fotovoltaica e hidráulica, es que los momentos en que hay viento, sol o agua, no necesariamente coinciden con la demanda, por lo cual es necesario almacenarla para sacarle mayor provecho. Por otro lado, el sector transporte tiene un aporte significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial.

Una de las líneas de interés para las energías renovables actualmente es el aprovechamiento del hidrógeno verde. El hidrógeno puede ser empleado en centrales de energías renovables como un medio de almacenamiento cuando la oferta sobrepase la demanda. Mediante el uso de electrolizadores, la energía que no se está utilizando puede usarse para generar hidrógeno a partir de agua, este puede ser llevado a tanques de almacenamiento y posteriormente usarse cuando se requiera mediante pilas de hidrógeno, las cuales realizan el proceso inverso a la electrólisis generando energía eléctrica y vapor de agua a partir de hidrógeno y oxígeno.

También el hidrógeno puede utilizarse como combustible alternativo en motores de combustión interna, ya que este, a diferencia de los hidrocarburos no genera gases de efecto invernadero. Además, este puede emplearse para generar calor al ser quemado directamente.

Por su parte, el hidrógeno es un elemento gaseoso reactivo, insípido e incoloro. Además, es un gas diatómico altamente inflamable; es el más ligero portador de energía y el más abundante en el universo (75 %) y es considerado como una solución futura para reemplazar

a los combustibles convencionales ya que, al ser quemado, o al reaccionar con el oxígeno genera como subproducto solamente agua.

El presente trabajo de investigación fue realizado en el período de octubre de 2021 a marzo de 2022, y presenta las diferentes tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis disponibles en la actualidad, muestra el diseño de un prototipo de electrolizador y evalúa sus parámetros de funcionamiento, lo cual significa un punto de partida para la investigación del hidrógeno verde en la casa de estudios UNAN Managua.

1.2 Planteamiento del problema

1.2.1 Caracterización del problema

Las tecnologías del hidrógeno apuntan a resolver diversos problemas energéticos y de sostenibilidad ambiental.

Primero: El CO₂ supone un 77,6% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero a nivel global, siendo la actividad más contaminante el transporte el cual representa un 27,7 de las emisiones y demás las actividades como la industria - 21.4%, agricultura y ganadería - 14.1%, generación de electricidad - 10.3%, consumo de combustibles - 8.2% y residuos - 5.1%. (Álcantara & Padiila, 2005)

Segundo: En la actualidad, prácticamente la totalidad del hidrógeno producido en el mundo proviene de combustibles fósiles. El hidrógeno gris representa el 96% del total de la producción mundial. Eso significa que sus costos de producción están muy ligados a los precios de los combustibles fósiles, sobre todo del gas natural. El hidrógeno gris es producido a partir de la reformación de metano por vapor a partir de gas natural. Este es el sistema de producción más utilizado actualmente, el cual supone grandes emisiones de CO₂ (Aleasoft, 2020).

Tercero: La electricidad es el principal vector energético en la actualidad, ya que permite transportar la energía desde las centrales de producción hasta los usuarios, a través de la red eléctrica. Sin embargo, es difícil de almacenar. En la actualidad se dispone de una capacidad de almacenamiento de energía eléctrica muy baja (inferior al 5%), lo que implica que su producción debe estar sincronizada con la demanda, encendiendo y apagando las centrales de producción según las predicciones de consumo, que se van actualizando constantemente. En las centrales que funcionan a partir de fuentes renovables existen periodos en los que la demanda de energía es baja y el recurso se encuentra disponible en grandes cantidades, lo cual significa que en ciertos momentos el recurso no se aprovecha en su totalidad (Ares, Leardini, Sánchez, Fernandez, & Ferrer, 2019).

Cuarto: El petróleo es un producto básico de uso extendido a nivel mundial que es parte sustantiva del desarrollo productivo y por ende del bienestar que disfruta la humanidad como

cualquier recurso que debe ser extraído del patrimonio natural, su disponibilidad no es uniforme en el mundo, las fluctuaciones de sus precios se ven afectados por varios factores, como los que tienen relación con el nivel de reservas probadas, la capacidad de explotación y el nivel esperado de la demanda, pueden ocurrir acontecimientos geopolíticos que podrían alterar abruptamente estas predicciones (Sánchez & Vargas, 2005).

1.2.2 Delimitación del problema

Debido a lo anteriormente descrito, se determina que no existen suficientes estudios acerca del hidrógeno en el país tomando en cuenta la importancia que tiene el hidrógeno para un futuro energético sostenible, por lo cual se encuentra la necesidad de sentar las bases de un estudio formal a nivel de universidad que permita desarrollar una metodología para evaluar las tecnologías de generación de hidrógeno mediante electrólisis.

1.2.3 Formulación del problema

Tomando en cuenta lo anterior, surge la principal interrogante para poder dar la solución a la problemática: ¿Cuál es la metodología para evaluar los parámetros técnicos del sistema de electrólisis alcalina propuesto?

1.2.4 Sistematización del problema

¿Cuáles son los aspectos funcionales y constructivos a tomar en cuenta para diseñar un sistema de electrólisis alcalina?

¿Cuáles son las variables físico-químicas que intervienen en el proceso de la electrólisis del sistema y cuál es su relación?

¿Cuál es el procedimiento para calcular la eficiencia energética de un electrolizador alcalino?

¿Cuáles son los parámetros de las distintas tecnologías de generación de hidrógeno por electrólisis?

1.3 Justificación

La presente investigación es importante, debido a que representa el punto de partida del estudio del hidrógeno como vector energético en la UNAN - Managua, por tanto, podría servir de referencia para futuras investigaciones.

De esta investigación se podrían beneficiar estudiantes, investigadores, profesores, debido a que ayuda al aprendizaje acerca de tecnologías emergentes y en crecimiento y da las pautas para el diseño de electrolizadores, lo cual promueve la innovación.

Esta investigación tiene un alto valor teórico debido a que explica los fundamentos físico-químicos de la electrólisis, ayuda a conocer en mayor medida el comportamiento de las variables involucradas en este proceso, describe los diferentes tipos de tecnologías de generación de hidrógeno y proporciona una fuente de información para poner al lector en contexto acerca del aprovechamiento del hidrógeno como vector energético.

En cuanto a su implicación práctica, la presente investigación contribuye al estudio de tecnologías de producción de hidrógeno, el cual tiene diversas aplicaciones en diversas ramas de la ingeniería. Algunas de estas son: almacenamiento de energía limpia, disminución de emisiones de carbono en motores de combustión interna, industria química, industria agrícola, soldadura, entre otras. Además, contribuye a la elaboración de prototipos para el estudio de las tecnologías del hidrógeno.

También, este estudio tiene una utilidad metodológica puesto que facilita la experimentación con este tipo de tecnologías y muestra un procedimiento para la recolección y análisis estadístico de datos, el cual puede ser empleado para otros estudios.

1.4 Objetivos

General

Evaluar los parámetros técnicos de funcionamiento del sistema de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno.

Específicos

- Describir funcional y constructivamente el prototipo de sistema de electrólisis alcalina diseñado
- Determinar la relación entre las variables físico-químicas que intervienen en el proceso de electrólisis de la celda.
- Calcular la eficiencia energética de la celda de electrólisis alcalina.
- Comparar teóricamente las diferentes tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis

Capítulo 2

2.1 Antecedentes

Quezada Romero, Torres Gualan (2014) en su trabajo de tesis de grado realizado en Cuenca, Ecuador, construyeron e implementaron un generador de HHO de celda seca en tres modelos distintos de vehículos concluyendo que al adicionar gas HHO a la mezcla aire-combustible del motor de combustión se pueden reducir las emisiones de gases contaminantes, obteniendo una reducción de 24 ppm a 5 ppm de CO en uno de los modelos (pág. 114 - 124).

Díaz Rey, González Gil, González Estrada (2018) realizaron un análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna en Santander, Colombia, con el cual concluyeron en una reducción de entre un 13 y 18% de emisiones de CO, con un aumento del 5% al 9% de emisiones de CO₂, mejorándose la quema del combustible y disminuyendo las ppm de hidrocarburos en el tubo de escape de entre un 30% y un 54%. Además obtuvieron una disminución en el valor del consumo específico de combustible, SFC, de 7.3 % al ser adicionado a la mezcla gas HHO. Todos estos resultados sin perjudicar significativamente la eficiencia mecánica del motor (pág. 143 - 154).

Clemente Jul, Sánchez Delgado, & Rodríguez (2018), en su artículo *Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables*, realizaron un modelo matemático a través del software MATLAB a partir de los datos experimentales obtenidos en diferentes ensayos de celdas de electrolisis alcalina el cual demostró una correlación entre la temperatura de operación, la tensión eléctrica y la eficiencia del sistema, además de un alto nivel de relación entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante el modelo matemático propuesto (pág. 28 – 33).

Alvares Contreras, Mendieta Gaitán (2016) en su investigación de grado efectuada en Managua, Nicaragua, realizaron un proceso de descarbonización a un motor de combustión interna mediante la implementación de una celda de HHO. A través de la experimentación con el motor en diversas marchas y el análisis de datos se obtuvo una disminución en el consumo de combustible del 7% con la celda, además de una disminución del 52% de emisiones de hidrocarburos (pág. 37 – 48).

2.2 Marco teórico

2.2.1 El hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, se calcula que 90% de todos los átomos del universo son de hidrógeno y, en términos de masa, se estima que es 75%, aproximadamente. En su forma más estable y abundante el átomo de hidrógeno está compuesto de un protón y un electrón. Además, existen dos isótopos: el deuterio y el tritio; el primero tiene un protón, un neutrón y un electrón, mientras que el segundo tiene un protón, dos neutrones y un electrón. De los tres, el H (a veces también llamado protio) corresponde a 99.9885%; el resto es deuterio. Es decir, en la naturaleza por cada átomo de deuterio existen 8694 átomos de protio. El tritio no se considera en esta cuenta porque no se presenta de manera natural, sino que es producido por el ser humano. A diferencia del carbón, el petróleo o el gas, el hidrógeno no es un recurso natural, no se puede obtener de la naturaleza por tareas de minería o extracción como es el caso de los recursos fósiles en general (Alcantará, 2019, pág. 72).

Lo más común es encontrar que el hidrógeno forma parte de muchos compuestos, gracias a que reacciona prácticamente con toda la tabla periódica para formar agua, sales, hidruros, ácidos, metano, amoníaco, polímeros, etcétera. El hidrógeno puede formar enlaces iónicos o covalentes; puede formar compuestos simples o complejos; puede participar en reacciones químicas, electroquímicas, organometálicas, orgánicas, biológicas, ácido-base y un gran etcétera. En los compuestos químicos, el átomo de hidrógeno puede tender puentes (llamados de hidrógeno) entre las moléculas; esto las hace excepcionalmente estables, como el agua o el ADN (Alcantará, 2019, pág. 74).

La riqueza en la química de este elemento radica en su posibilidad de formar tanto iones negativos (H^- , cuando captura un electrón adicional) como iones positivos (H^+ , al perder su electrón). Es por esto que en algunas tablas periódicas antiguas el hidrógeno aparece arriba del grupo de los halógenos, o en otras está de forma aislada, aunque lo habitual es que se encuentre en la parte superior de la familia de los metales alcalinos (Alcantará, 2019, pág. 74)

El hidrógeno es un portador de energía (como la electricidad), es necesario producirlo a partir de otras materias primas (agua, biomasa, recursos fósiles), y para convertir estas materias en

hidrógeno hay que seguir unas transformaciones en las que se consume algún tipo de energía primaria (nuclear, renovable o fósil) (Miranda Barreras & Aguer Hortal, 2007).

2.2.1.1 Propiedades del Hidrógeno.

Algunas de las propiedades físicas del hidrógeno son reflejadas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades físicas del hidrógeno.

Propiedad	Valor
Punto de fusión	-259,10°C
Punto de ebullición	-257,77 °C
Densidad de líquido	0,0899Kg/m ³
Densidad del gas	70,9Kg/m ³
Entalpia de vaporización	0,8985kJ/mol
Coefficiente de difusión en el aire (a T y P normales)	0,61 cm ² /s
Límite de inflamabilidad en el aire	4,0-75,0% v
Límite de inflamabilidad en oxígeno	4,5-94,0% v
Temperatura de ignición en el aire	585 °C
Temperatura de ignición en oxígeno	560 °C
Temperatura de la llama aire	2045 °C
Densidad relativa de vapor (IIRE = 1)	0,07
Poder calorífico superior (PCS)	3,54kWh/Nm ³
Poder calorífico interior (PCI)	3,0kWh/Nm ³

2.2.1.2 Densidad y medidas relacionadas

El hidrógeno es el elemento químico con menor peso atómico, por lo que su densidad es muy baja tanto en estado líquido como en estado gaseoso. La densidad del hidrógeno es dependiente de las condiciones de temperatura y presión, ya que ambos parámetros afectan a su disposición en el espacio, especialmente en estado gaseoso. El volumen específico se define como el valor inverso de la densidad y expresa la cantidad de volumen por unidad de El volumen específico del hidrógeno gaseoso es de 11,9 m³ /kg a 20 °C y 1 atm, y el volumen

específico del hidrógeno líquido es de $0,014 \text{ m}^3/\text{kg}$ a $-253 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm (Molina, Roca, Pérez, Gato, Pardo, y Rolle, 2021).

El peso específico es una forma muy habitual de expresar la densidad y se define como la relación entre la densidad de una sustancia y la de otra sustancia de referencia a la misma temperatura y presión. En el caso de gases y vapores, se utiliza el aire ($\rho_{\text{aire}} = 1,2754 \text{ kg/m}^3$) en condiciones estándar de la IUPAC ($0 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 bar) como sustancia de referencia, de forma que los gases con un peso específico inferior a la unidad son más ligeros que el aire, mientras que los gases con un peso específico superior son más pesados que el aire. El peso específico del hidrógeno gaseoso es $0,0696$, lo que significa que su densidad es de tan sólo un $6,96 \%$ de la densidad del aire (Molina et al., 2021).

La sustancia de referencia para líquidos es el agua ($\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$) a $4 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 bar , de forma que un líquido con un peso específico inferior a la unidad será más ligero que el agua y viceversa. Incluso en estado líquido, el hidrógeno no es muy denso. El hidrógeno líquido es bastante más ligero que el agua, con un peso específico de $0,0708$ o un $7,08 \%$ de la densidad de la sustancia de referencia. Irónicamente, cada metro cúbico de agua contiene 111 kg de hidrógeno, mientras que un metro cúbico de hidrógeno líquido contiene solo 71 kg de hidrógeno. Por lo tanto, el agua contiene más masa de hidrógeno por unidad de volumen que el propio hidrógeno, debido a su estructura molecular compacta. Esto también sucede en la mayoría de los compuestos líquidos que contienen hidrógeno; un metro cúbico de metanol contiene 100 kg de hidrógeno y un metro cúbico de heptano contiene 113 kg (Molina et al., 2021).

2.2.1.2.1 Relación de expansión

La diferencia de volumen entre el hidrógeno líquido y gaseoso se puede apreciar fácilmente considerando su relación de expansión. La relación de expansión es la relación del volumen al que se almacena un gas o líquido en comparación con el volumen del gas o líquido a presión y temperatura atmosféricas. Cuando el hidrógeno se almacena en estado líquido, se vaporiza al expandirse hasta condiciones atmosféricas, con el correspondiente aumento de volumen. Como se muestra en la Figura 2.1, la relación de expansión del hidrógeno de $1:848$ significa que el hidrógeno en estado gaseoso en condiciones atmosféricas ocupa 848 veces más volumen que en estado líquido (Molina et al., 2021).

Cuando el hidrógeno se almacena en estado gaseoso a 250 bar y temperatura atmosférica, su relación de expansión a presión atmosférica es 1:240. Aunque una presión de almacenamiento más alta aumenta algo la relación de expansión, la relación de expansión del hidrógeno gaseoso presurizado no puede alcanzar la relación de expansión del hidrógeno líquido (Molina et al., 2021).

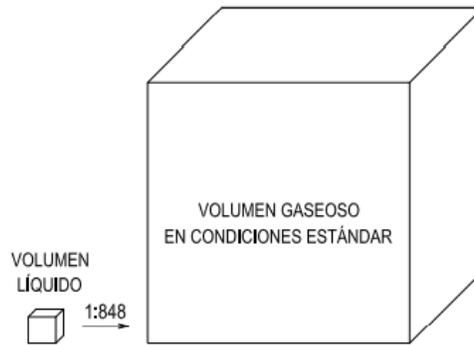


Figura 2.1. Relación de expansión de líquido a gas

2.2.1.2.2 Temperaturas de cambio de fase

La mayoría de las sustancias pueden cambiar de un estado de agregación a otro en función de sus condiciones de temperatura y presión. Cada sustancia presenta unas temperaturas de ebullición y fusión características a una determinada presión. Los puntos de ebullición y de fusión del hidrógeno son, tras los del helio, los segundos más bajos de todas las sustancias que existen en la naturaleza.

En el diagrama de fases del hidrógeno representado en la Figura 2.2, se observa que a presión atmosférica el hidrógeno es líquido a temperaturas inferiores a 20 K (-253 °C) y sólido a temperaturas por debajo de 14 K (-259 °C). El hidrógeno tiene el segundo punto de ebullición y el segundo punto de fusión más bajos de todas las sustancias, sólo superado por el helio

A temperaturas por debajo de 1 K, el hidrógeno tiene una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, y por encima de 5 K, tiene una estructura hexagonal compacta. El punto triple está situado a 0,0695 atm y 13,8 K. El punto de ebullición varía con la presión y la temperatura, y el hidrógeno alcanza el estado supercrítico por encima de 13,8 atm y 33,2K (Molina et al., 2021).

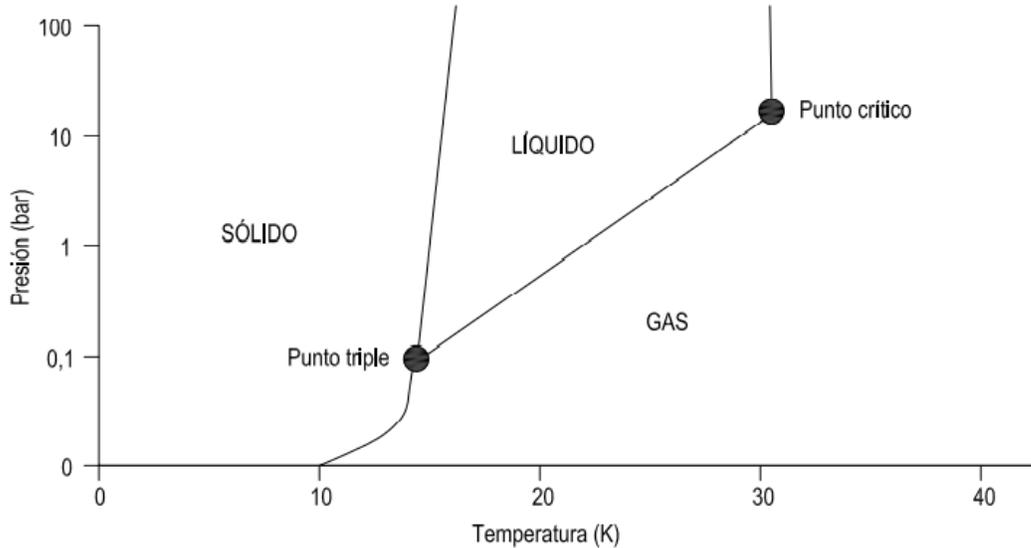


Figura 2.2. Diagrama de fases del hidrógeno

Las sustancias líquidas generalmente ocupan menos espacio que las sustancias gaseosas, por lo que son habitualmente más fáciles de transportar y manejar. Por este motivo, la temperatura de ebullición de una sustancia es un parámetro crítico, pues determina la temperatura a la que debe enfriarse a presión atmosférica para ser utilizada en estado líquido. La temperatura de ebullición de una sustancia pura aumenta con la presión hasta alcanzar su punto crítico, por encima del cual un aumento de la presión no tiene ningún efecto sobre la temperatura de ebullición.

La temperatura de ebullición del hidrógeno sólo se puede aumentar hasta un máximo de -240 °C con una presión de aproximadamente 13 bar, que se corresponde con su punto crítico. Debido a la extremadamente baja temperatura de ebullición del hidrógeno, la obtención de hidrógeno líquido es un proceso sumamente complejo y de gran consumo energético. Además, una vez en estado líquido el hidrógeno es muy volátil y se evapora rápidamente, por lo que los depósitos contenedores deben estar perfectamente aislados para evitar pérdidas (Molina et al., 2021).

2.2.1.2.3 Factor de compresibilidad

El factor de compresibilidad Z es un factor de corrección que se introduce en la ecuación de estado de los gases ideales para modelar el comportamiento de los gases reales. Un gas real se comporta como gas ideal en condiciones de baja presión y alta temperatura con respecto a los valores del punto crítico. Por tanto, si la temperatura del gas es muy superior a la del punto crítico o su presión es mucho menor que la del punto crítico, puede considerarse ideal. En cambio, la desviación de un gas con respecto a su comportamiento ideal es mayor si sus condiciones de temperatura y presión se sitúan próximas a las de su punto crítico. Introduciendo el factor de compresibilidad Z en la ecuación de los gases ideales, se obtiene una ecuación de estado que puede utilizarse para un gas real (Cengel & Boles, 2012)

$$P \cdot v = Z \cdot R \cdot T$$

El factor de compresibilidad es un parámetro muy útil para estimar la cantidad de hidrógeno contenido en un recipiente. Utilizando el factor de compresibilidad, se puede demostrar a partir de la Figura 2.3 cómo el volumen ocupado por el hidrógeno gaseoso se reduce si se somete a presiones crecientes. Se observa que, por encima de 800 bar, un aumento de presión apenas afecta ya al volumen ocupado por el hidrógeno gaseoso.

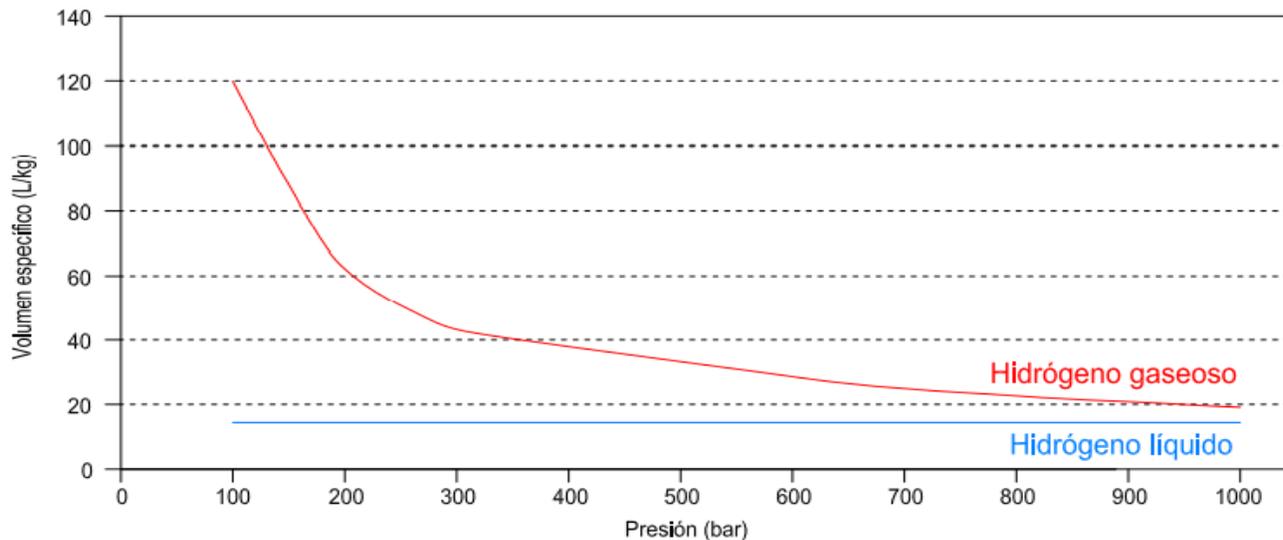


Figura 2.3. Volumen específico del hidrógeno en estado gaseoso y líquido. Fuente: Molina et al (2021)

Es evidente que presurizando el hidrógeno gaseoso se puede reducir sustancialmente su volumen, aspecto que puede resultar útil para su almacenamiento. De hecho, el almacenamiento de hidrógeno gaseoso presurizado es el más habitual, a pesar de que la energía que se requiere en la compresión es considerable (Molina et al., 2021).

2.2.2 Producción de hidrógeno

En la actualidad prácticamente el 96% del hidrógeno mundial se produce a partir de combustibles fósiles, principalmente por reformado de gas natural con vapor de agua, y se consume como un componente que forma parte de multitud de procesos convencionales, especialmente (en torno a un 72%) en la industria química y petroquímica (refino del petróleo, amoníaco, metanol, etc.). El resto se utiliza en metalurgia, en electrónica y en la propulsión de vehículos espaciales (Molina et al., 2021).

Tan solo un 4% del total se produce por electrólisis del agua que es el hidrógeno destinado a las aplicaciones que requieren una gran pureza del gas. Por lo tanto, las tecnologías de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, especialmente a partir de gas natural, son tecnologías demostradas y actualmente en aplicación. Las principales desventajas que presentan son que en el proceso de producción de hidrógeno se emite también CO₂, y que se están utilizando como materias primas recursos agotables, de los que se dispone de unas reservas limitadas y concentradas en pocos lugares del globo terráqueo (Molina et al., 2021)

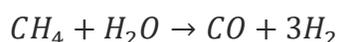
2.2.2.1 Obtención a partir de combustibles fósiles

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. La estructura molecular consiste en una armazón de átomos de Carbono a los que se unen los átomos de Hidrógeno. Las cadenas de átomos de carbono pueden ser lineales o ramificadas y abiertas o cerradas.

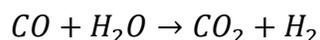
El hidrógeno se puede producir a partir de combustibles fósiles usando procesos termoquímicos (gasificación de carbón o reformación de gas natural) con una eficiencia más alta que la eficiencia de generación de electricidad o la eficiencia de producción de otros combustibles sintéticos (tal como metanol) (García , 2019, p.5).

2.2.2.1.1 Reformado de hidrocarburos y metanol mediante vapor

La reacción que se verifica en la primera fase es la de reformado propiamente dicho, que posee una entalpía de reacción estándar de +206,14 kJ/mol, es decir, es endotérmica. Se produce a temperaturas alrededor de 900°C en unos tubos por los que circulan el metano y el vapor de agua a través de lechos catalizadores de base de níquel. Los tubos están contenidos en un horno cuya temperatura es de alrededor de 960°C, que se mantiene mediante quemadores. (Hurtado & Soria , 2007, p.33).



A la salida del reformador el gas se dirige a la unidad de desplazamiento de CO (“CO-shift”) en la que se verifica la reacción sobre catalizadores de cobre, que posee una entalpía de reacción estándar de -41,17 kJ/mol, siendo por tanto exotérmica. La cantidad de calor liberada y su nivel de temperatura no es suficiente para satisfacer totalmente la demanda de la reacción de reformado, por lo que parte del gas natural se emplea en los quemadores para mantener la temperatura de operación del reformador. El calor liberado en la reacción de desplazamiento se aprovecha para precalentar el gas natural a su entrada al reformador. (Hurtado & Soria , 2007, p.33)



El gas producido como consecuencia de las reacciones 1 y 2 pasa por un condensador en el que se le retira el vapor de agua y finalmente llega a la tercera fase del proceso, la de depuración. El gas que llega a esta unidad es un gas rico en H₂ con CO₂, restos de agua, CO y CH₄. Esta corriente gaseosa se depura en un sistema separador de membranas o de adsorción-desorción (PSA, “Pressure Swing Adsorption”) de donde se obtiene hidrógeno con una pureza de, 99,999%. (Hurtado & Soria , 2007, p.33)

2.2.2.1.2 Producción a partir de carbón

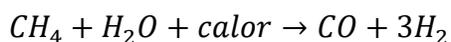
La producción de hidrógeno por gasificación de carbón es una tecnología madura establecida comercialmente. El proceso es más complejo que el reformado de gas natural y, en general, el coste del hidrógeno producido por gasificación de carbón es más alto que el obtenido por SMR (García , 2019, p.6)

El fundamento de la gasificación del carbón es su oxidación parcial en presencia de oxígeno y vapor de agua. Cuando este proceso se realiza a temperaturas superiores a 1000°C, se produce fundamentalmente CO y de H₂ el CO se desplaza a CO₂ y, por último, la mezcla resultante de H₂ y CO₂ e impurezas se separa utilizando procesos de absorción física. Esta técnica no es adecuada para plantas de producción descentralizada debido a que presenta una gran economía de escala y a que la captura y almacenamiento de CO₂ en sistemas pequeños sería difícil y cara. Sin embargo, la producción de hidrógeno centralizada en plantas tipo GICC es una opción particularmente atractiva tanto por la mayor eficiencia obtenida en la coproducción de electricidad e hidrógeno, como por las posibilidades de captura del CO₂ (García , 2019, p.6).

2.2.2.1.3 *Procesos desde gas natural*

La fuente principal de producción de hidrógeno industrial es el gas natural y el método más barato el reformado con vapor de agua (SMR – “steam methane reforming”), aunque también existen los procesos de oxidación parcial (POX) y reformado autotérmico (ATR).

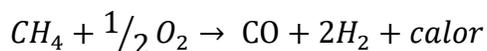
El reformado de gas natural con vapor de agua es una reacción endotérmica, que opera en unas temperaturas entre 700 y 850 °C y presiones de 3 a 25 bar, por la que se convierten estos reactantes en hidrógeno y monóxido de carbono (García , 2019, p.5)



Normalmente se hace reaccionar el CO con vapor de agua (reacción de desplazamiento) para convertirlo en CO₂ y obtener una producción adicional de hidrógeno.



El reformado con vapor de agua, en plantas centralizadas, puede alcanzar eficiencias del 85% (sin considerar la compresión del H₂), ofreciendo bajos niveles de emisión y bajos costes del hidrógeno producido. La oxidación parcial es un proceso exotérmico, en el que el gas natural se oxida solamente hasta CO al entrar en reacción con oxígeno gas, del que se obtiene una producción menor de hidrógeno por cada mol de metano que reacciona (García , 2019, p.5)



El calor se libera a una temperatura entre 800 y 1100 °C. El carácter exotérmico del proceso permite diseños de la planta más compactos que con el SMR. El reformado autotérmico es una combinación de los anteriores que se diseña de forma que el calor excedentario de la oxidación parcial se utiliza para abastecer las necesidades del reformado con vapor. La planta se dimensiona de modo que el proceso global sea ligeramente exotérmico. La temperatura de salida del reactor se sitúa entre 950 y 1100 °C, y la presión del gas puede alcanzar 100 bar. Aunque el diseño del reactor es más complejo que en los casos anteriores, en el futuro esta tecnología puede ofrecer altas eficiencias en unidades pequeñas (García , 2019, p.6).

2.2.2.2 Obtención a partir de electrólisis del agua

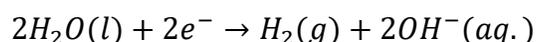
La electrólisis del agua consiste en hacer circular una corriente continua a través del agua para separar sus moléculas en hidrógeno y oxígeno. Este proceso ocurre de manera controlada dentro de un dispositivo que se llama electrolizador.

El electrolizador está compuesto de dos terminales metálicos: ánodo y cátodo, separados a una cierta distancia, sumergidos en una solución o electrolito. El ánodo es el terminal del electrolizador al cual está conectado el terminal positivo de la batería o fuente de poder en corriente continua. El cátodo es el terminal del electrolizador al cual está conectado el terminal negativo. Se aplica una tensión DC en estos electrodos y se produce la reacción electroquímica en la superficie de ellos. En el ánodo se produce oxígeno y en el cátodo se produce hidrógeno (Molina et al., 2021, p.82).

2.2.2.2.1 Electrolisis alcalina

Está conformado por dos electrodos separados por una membrana o diafragma separador de gases. Este conjunto se encuentra sumergido en un electrolito líquido que suele ser una solución acuosa concentrada de agua destilada con KOH (hidróxido de potasio), del orden de 25-30% en peso, para aumentar su conductividad iónica (Molina et al., 2021, p.91).

Se produce hidrógeno gaseoso en la superficie del cátodo y los iones producidos son impulsados por el campo eléctrico hacia el ánodo según la siguiente reacción:



En el ánodo los iones producidos anteriormente se recombinan, para producir oxígeno y liberar electrones hacia el circuito eléctrico exterior

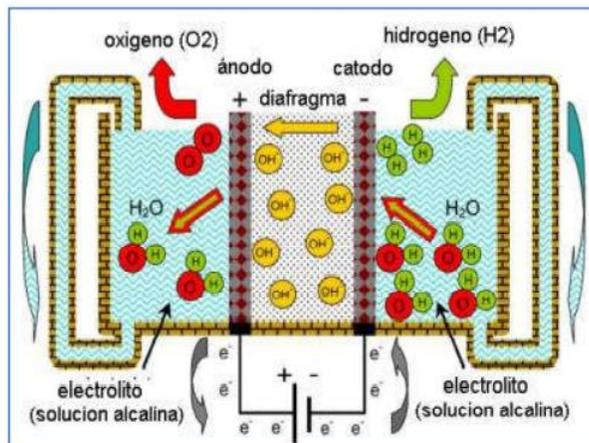
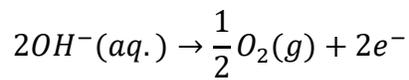


Figura 2.4. Funcionamiento de un electrolizador alcalino. Fuente: Molina et al (2021).

2.2.2.2.2 *Electrolisis por membrana de electrolito polimérico*

En los electrolizadores PEM, el electrolito es una membrana polimérica delgada, que no permite que se mezclen los gases, ni permite la conducción electrónica. Está compuesta por grupos funcionales del ácido sulfónico ($-\text{SO}_3\text{H}$) que son responsables de la capacidad de conducción del protón (H^+) a través de ella. La membrana más utilizada para la electrólisis del agua es Nafion (Molina et al., 2021, p.92).

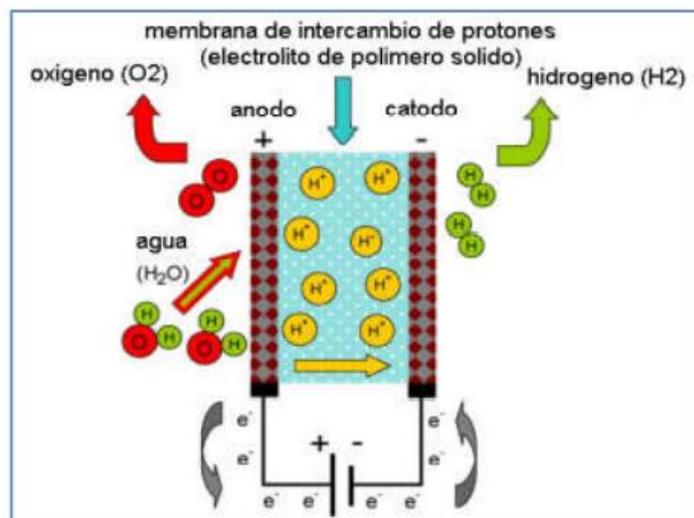
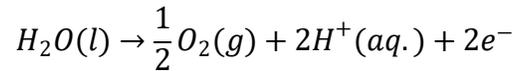
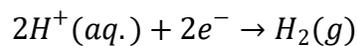


Figura 2.5. Principio de funcionamiento del electrolizador PEM. Fuente: Molina et al (2021).

En el ánodo, se produce la siguiente reacción:



La molécula de agua se rompe y se produce oxígeno. Se liberan electrones al circuito eléctrico exterior y se liberan protones de hidrógeno. Estos protones son impulsados por el campo eléctrico a través de la membrana hacia el cátodo. Una vez en el cátodo, se combinan con electrones del circuito eléctrico exterior y forman hidrógeno de acuerdo a la siguiente ecuación (Molina et al., 2021, p.92).



Las ventajas de este proceso son:

- Se alcanzan altas densidades de corriente debido a lo delgado de la membrana que es capaz de brindar buena conductividad de protones (0,1 S/cm).
- El transporte de protones a través de la membrana es rápido debido a que esta se diseñó con ese propósito específico.
- Buen rango de carga parcial. La celda puede trabajar desde un 10% hasta el 100% de la potencia de entrada nominal.
- Diseño del sistema compacto debido al electrolito sólido.
- Alta pureza del gas producido (99,999%) debido a que la membrana impide el cruce de gases producidos.
- Es ecológicamente limpio, debido a que no ocupa elementos químicos extras en el agua, como el caso del electrolizador alcalino.
- Los electrolizadores PEM son de tamaño reducido debido a la alta densidad de corriente que alcanza (mayor a 1A/cm²)

2.2.2.2.3 *Electrolisis SOE (óxido sólido)*

Permite la electrólisis del vapor a altas temperaturas (600°C - 900°C), lo que resulta en mayores eficiencias comparadas con los electrolizadores alcalinos o PEM.

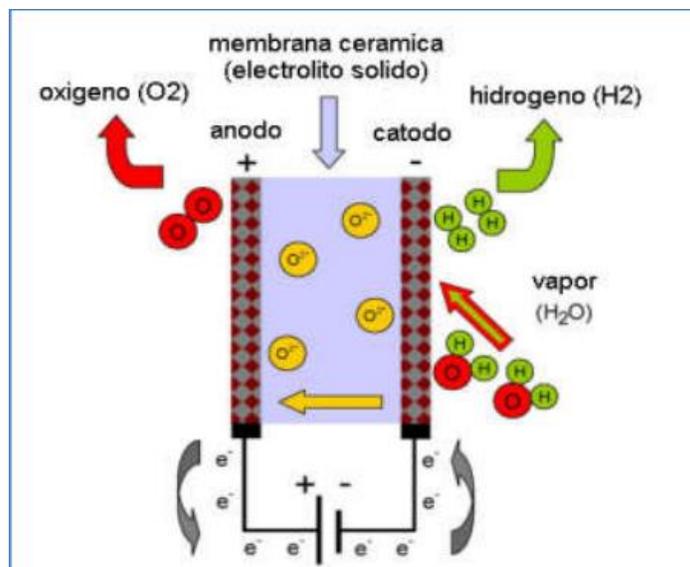
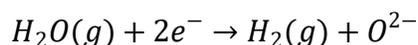
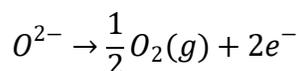


Figura 2.6. Principio de funcionamiento de un electrolizador SOE. Fuente: Molina et al (2021).

En el cátodo, el agua se reduce para producir hidrógeno según la ecuación:



Por la acción del campo eléctrico aplicado, los aniones de óxido generados en el cátodo pasan a través del electrolito sólido al ánodo, donde se recombinan de acuerdo a la ecuación, formando oxígeno y liberando electrones hacia el circuito exterior



Algunas ventajas del electrolizador óxido sólido son:

- Permite operar a alta presión, por lo cual se evita ocupar energía en una etapa posterior de compresión de gases.
- No depende de elementos químicos nobles como catalizadores, que aumentan el costo de la construcción del equipo.
- La eficiencia del proceso de conversión electroquímico es del 100%. Toda la energía eléctrica aplicada es convertida en energía química almacenada en hidrógeno y oxígeno.

Sin embargo, este último punto también es su gran desventaja, debido a que el proceso debe efectuarse a altas temperaturas (entre 600 a 900 °C) con la consiguiente baja durabilidad de las cerámicas. Además, se necesita una fuente de energía adicional (nuclear, solar geotérmica u otra) que permita llegar a esas temperaturas (Molina et al., 2021, p.93).

2.2.2.2.4 Foto electrólisis

Los sistemas fotovoltaicos unidos a electrolizadores están comercialmente disponibles. Los sistemas ofrecen una mayor flexibilidad, produciendo energía desde las células fotovoltaicas e Hidrógeno desde el electrolizador. La fotoelectrólisis directa representa una alternativa avanzada a la anterior, uniendo los dos sistemas en un único aparato (Sarabia & Artola, 2017, p.27).

2.2.2.3 Obtención fotobiológica

El hidrógeno puede producirse también mediante sistemas biológicos. Algunos microorganismos fotosintéticos son capaces de realizar la ruptura de la molécula de agua en sus componentes (H_2 y O_2). Algunas algas, como el alga verde *Scenedesmus*, producen H_2 cuando se iluminan con luz visible o cuando se mantienen en condiciones anaeróbicas y en ausencia de luz. Las algas verdes se aplican igualmente en otro método de producción de H_2 . La especie *Scenedesmus* produce hidrógeno no solamente bajo irradiación con luz sino también por vía fermentativa en condiciones anaeróbicas, utilizando almidón como fuente reductora. Aunque la velocidad de producción de H_2 por unidad de peso conforme a la vía fermentativa es menor que la obtenida mediante irradiación con luz, la producción se mantiene estable debido a la ausencia de oxígeno. Las cianobacterias producen también hidrógeno mediante fermentación, en ausencia de luz y en condiciones anaeróbicas. Entre las distintas cianobacterias ensayadas, la especie *Espirulina* es la que presenta una actividad más elevada (Sarabia & Artola, 2017, p.27).

2.2.2.4 Obtención por descomposición a alta temperatura

La ruptura del agua a alta temperatura se produce a unos $3000^\circ C$. A esta temperatura, un 10% del agua se descompone y el 90% se recicla. Hay otros procesos sugeridos que rebajan la temperatura (Sarabia & Artola, 2017, p.28)

1. Ciclos termoquímicos
2. Sistemas híbridos que unen la descomposición térmica y electrolítica
3. Descomposición catalítica directa con separación a través de membrana de cerámica

En estos procesos se puede esperar una eficiencia del 50 %. El problema es que hay que buscar materiales que tengan resistencia a la corrosión a altas temperaturas, ya que los

procesos de separación en la membrana se producen a altas temperaturas. La seguridad es muy importante en estos procesos (Sarabia & Artola, 2017, p.28).

2.2.2.4.1 Obtención a partir de la ruptura termoquímica del agua

Los ciclos termoquímicos están basados en la combinación de una serie de reacciones químicas operando en un ciclo cerrado en las que el hidrógeno se obtiene del agua y los reactivos se recuperan y reciclan. Como fuente de energía calorífica se puede utilizar o bien energía nuclear o bien energía solar térmica de alta temperatura dependiendo de los niveles de temperatura que exija cada ciclo (Sarabia & Artola, 2017, p.28).

Desde hace años se vienen desarrollando multitud de estos ciclos, aunque los más utilizados son: Ciclos SI (basados en la familia del azufre y del yodo), ciclo UT-3 (basados en bromuros de calcio y de hierro) y ciclos de óxidos sólidos (reacciones redox metal/óxido entre las que destacan las del zinc y el hierro). Los primeros dos comenzaron a desarrollarse pensando en el uso de la energía nuclear utilizando reactores VHTR (very-high temperature reactor), hoy en día en desarrollo dado que los reactores actuales de fisión no alcanzan la temperatura necesaria y, el último, se orienta al uso de la energía solar térmica de alta temperatura utilizando de centrales de concentración solar (Sarabia & Artola, 2017, p.29).

2.2.2.5 Obtención a partir de biomasa

Es posible obtener hidrógeno de la biomasa a partir de un gran número de procesos de tipo biológico y termoquímico. Los procesos biológicos son en general más lentos y costosos que los termoquímicos y en el futuro pueden llegar a jugar un papel de sistemas de producción de hidrógeno descentralizados, mientras que la producción centralizada, a partir de biomasa, se basará fundamentalmente en procesos termoquímicos, entre los que destacan la gasificación y la pirolisis (García , 2019, p.8).

El interés de la biomasa como materia prima para la obtención del hidrógeno radica, por un lado, en que aporta un balance de CO₂ neutro, de manera que la materia orgánica es capaz de retener durante su crecimiento el CO₂ que se libera durante la producción de hidrógeno,

y por otro, en que la biomasa es un recurso renovable y sostenible, siempre que su consumo no sea mayor que la capacidad de regeneración natural (García , 2019, p.8).

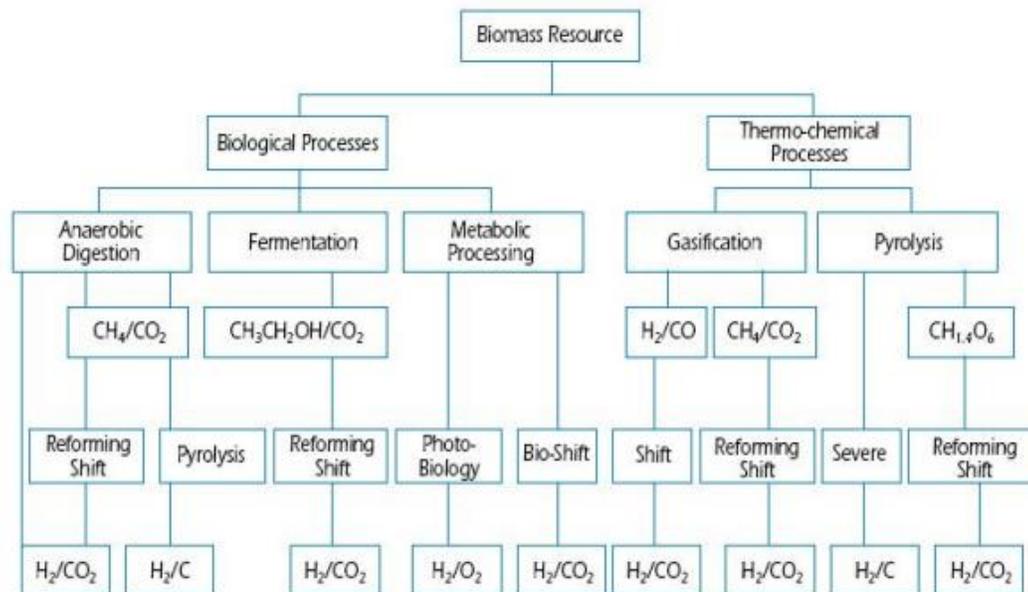


Figura 2.7. Procesos biológicos y termoquímicos. Fuente: García (2019)

2.2.2.5.1 Gasificación de biomasa

La gasificación de biomasa es un proceso similar al usado para la producción de hidrógeno a partir de carbón, aunque probablemente su escala de operación será menor debido fundamentalmente a su escaso contenido energético (la biomasa contiene sólo en torno a un 6% de H₂ en peso por término medio). Plantas de producción de gran escala requerirían grandes cantidades de biomasa y esto incrementaría considerablemente los costes de transporte.

La composición del gas resultante de la gasificación dependerá del tipo de biomasa que se utilice y de si la gasificación se realiza con aire o con oxígeno. Si se realiza con aire, el resultado es un gas pobre compuesto por H₂ y CO, pero también por CH₄, CO₂, H₂O y N₂, y en este caso, se suele realizar un reformado con vapor del gas pobre antes de llevar a cabo la reacción WGS¹ (García , 2019, p.9).

¹ Desplazamiento del gas de agua (Water Gas Shift)

La formación de alquitranes es uno de los principales problemas técnicos para el desarrollo de la gasificación de biomasa. La cantidad de alquitranes generados depende de numerosos parámetros del proceso: características de la biomasa (tipo, humedad, tamaño de partícula, ...) y condiciones de gasificación (temperatura, presión, tiempo de residencia del gas, velocidad de calentamiento de la biomasa, etc.). La condensación de los alquitranes en las zonas frías del equipo genera problemas de taponamiento y ensuciamiento, provocando paradas indeseadas de la instalación (García , 2019, p.9).

La producción de hidrógeno desde la biomasa compete con la producción de biocombustibles (bioetanol y biodiésel). Tanto el hidrógeno como los biocombustibles presentan la misma ventaja de ser neutros en emisiones de CO₂, sin embargo, los biocombustibles ofrecen ventajas adicionales, su tecnología de producción se encuentra en un estado más avanzado de desarrollo y ya están siendo introducidos en el mercado del transporte a través de su infraestructura de suministro. El uso de la biomasa para la producción de hidrógeno puede ser muy atractiva frente a la producción de biocombustibles si se combina con técnicas de captura y almacenamiento de CO₂, en cuyo caso el proceso lleva a emisiones negativas (García , 2019, p.10).

2.2.2.5.2 Pirólisis de la biomasa

Consiste en la combustión incompleta de la Biomasa en ausencia de Oxígeno, a unos 500 °C. Se obtiene Carbón Vegetal y Gas mezcla de Monóxido y Dióxido de Carbono, Hidrógeno e Hidrocarburos ligeros. El pirólisis de la biomasa: Para la producción de Hidrógeno tiene el potencial de ser competitivo económicamente con los actuales procesos comerciales para la producción de Hidrógeno. El concepto tiene algunas ventajas frente a la tecnología tradicional de gasificación (Sarabia & Artola, 2017. P.30).

2.2.2.5.3 Oxidación parcial de la biomasa con agua en estado supercrítico

Este tipo de proceso implica la producción de Hidrógeno a partir de los combustibles de 'bajo grado' como son las basuras municipales, la Biomasa y el Carbón con alto contenido en Azufre. La oxidación parcial del agua en estado supercrítico implica llevar a cabo reacciones oxidativas en un ambiente de agua en condiciones supercríticas, es decir, vapor a alta presión, en presencia de cantidades limitadas de oxidante, generalmente Oxígeno puro o aire. La oxidación parcial in situ calienta rápidamente el medio de gasificación, dando lugar a menos

Carbonización y una mejora en la producción de Hidrógeno. A altas presiones, un ambiente acuoso de alta densidad es ideal para la reacción y la gasificación orgánica. El alto contenido en agua del medio favorece la formación de Hidrógeno y de productos ricos en Hidrógeno y es compatible con pasos con alto contenido en agua como son los fangos y la Biomasa, y elimina la necesidad del proceso de secado de los pastos. El alto contenido en agua del ambiente también es efectivo para la gasificación de materiales pobres en Hidrógeno como es el Carbón. Actualmente este proceso se encuentra en investigación y desarrollo (Sarabia & Artola, 2017, p.30).

2.2.2.6 Desplazamiento hidrógeno desde los ácidos con los metales

Este es el método más sencillo de obtener hidrógeno en el laboratorio. Se muestra una reacción típica utilizando Ácido Clorhídrico (HCl) y Zinc (Zn): $Zn + 2HCl \rightarrow Zn^{2+} + H_2 + 2Cl^-$.

Utiliza cualquier base o Ácido para producir Hidrógeno, desde Aluminio y Agua, utilizando la siguiente reacción: $2Al + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2$.

Esta reacción ilustra lo importante que es almacenar aluminio puro en un lugar seco, ventilado ya que el gas H₂ puede explotar fácilmente si le es permitido acumularse (Sarabia & Artola, 2017, p.31).

2.2.2.7 Reformado de etanol y azúcares

Una forma simple de transporte del hidrógeno es mediante precursores renovables, tales como etanol (C₂H₅OH) y azúcares (C₆H₁₂O₆) en fase líquida. Estos precursores se transforman en hidrógeno mediante procesos de reformado con vapor de agua o bajo presión en fase líquida en el mismo lugar donde se consume el hidrógeno. El proceso de liberar H₂ partir de C₂H₅OH o C₆H₁₂O₆ se realiza en presencia de catalizadores específicos en sistemas de reacción diseñados para operar bien en fase gaseosa o en fase líquida. La ventaja que tienen ambos procesos es que la materia prima (C₂H₅OH y C₆H₁₂O₆) puede considerarse neutra respecto a las emisiones de CO₂. La dificultad principal que tienen estas reacciones es que no son selectivas debido a que, bajo las condiciones de reacción, se ven favorecidas otras reacciones laterales que dan lugar a subproductos no deseados (monóxido de carbono, metano, acetaldehído) y, por ello, a una disminución de la selectividad a H₂. Además, los catalizadores utilizados sufren procesos de desactivación por depósitos de carbón, lo que

dificulta la puesta en práctica de esta tecnología. El reto reside en el desarrollo de sistemas catalíticos que operen a temperaturas más bajas con el objetivo de minimizar los procesos de desactivación (Fierro, 2011).

2.2.3 Almacenamiento de hidrógeno

2.2.3.1 Hidrógeno gaseoso

La forma más convencional de almacenamiento del hidrógeno gas es a presión en botellas convencionales de acero o en tanques ligeros de fibra de carbono que han demostrado su capacidad de operar a presiones de 350 bar. En el caso de las aplicaciones de automoción, mientras que un almacenamiento a esta presión puede ser suficiente para la operación de autobuses, para turismos se requieren presiones más elevadas al objeto de reducir el volumen total del tanque. La solución apunta hacia el uso de botellas de almacenamiento a 700 bar, pero todavía se encuentran en fase de demostración. No obstante, antes de poder comenzar la producción comercial de sistemas de almacenamiento de hidrógeno a alta presión, es necesario resolver un conjunto de aspectos entre los que está la seguridad, la resistencia (efecto de los ciclos de carga en la vida del tanque) y el coste, dado el alto coste actual de los tanques de composite para alta presión y la penalización energética que supone la compresión hasta estos niveles. Así mismo, el hecho de que la forma ideal sea la cilíndrica hace difícil conformar el almacenamiento al espacio disponible en el vehículo (García , 2019, p.12).

2.2.3.2 Microesferas de cristal

Una alternativa al almacenamiento de hidrógeno gas, para aplicaciones de automoción, lo ofrecen las microesferas de vidrio. El proceso de carga del hidrógeno se realiza aprovechando la permeabilidad del hidrógeno a alta presión (350-700 bar) y temperaturas de 300°C en los huecos de las microesferas en un envase resistente a la presión. Una vez realizada la carga, el sistema se enfría hasta temperatura ambiente de forma que el gas queda retenido en las microesferas. A esta temperatura el tanque, así cargado, puede transferirse al vehículo. Posteriormente, para su uso, es necesario calentar las microesferas a 200-300°C para liberar el hidrógeno de forma controlada y alimentar el motor o la pila de combustible. Los principales problemas que presenta esta técnica son la baja densidad volumétrica y las altas presiones de llenado. Así mismo, las temperaturas de liberación del hidrógeno son demasiado altas si se considera su uso en vehículos a pila de combustible tipo PEM, que opera en torno

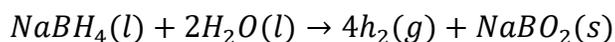
a 70-80°C. No obstante, ofrecen la ventaja de ser inherentemente seguras dado que el hidrógeno se almacena a bordo a baja presión y que es una técnica adecuada para tanques moldeables. Se ha demostrado una densidad de almacenamiento del 5,4 % en peso (Hydrogen Implementing Agreement – Agencia Internacional de la Energía) (García , 2019, p.12).

2.2.3.3 Hidrógeno líquido

El hidrógeno puede almacenarse en forma líquida a temperaturas criogénicas (-253°C). Como principal ventaja el hidrógeno líquido ofrece su densidad energética por unidad de volumen (muy superior a la del hidrógeno gas) incluso a relativamente bajas presiones. Sin embargo, también presenta importantes desventajas, aunque su uso en el sector automoción ya haya sido probado por algunos fabricantes importantes (BMW). Aproximadamente, en el proceso de licuación del hidrógeno se pierde del 30 al 40% de la energía. Además, existen pérdidas por evaporación en los periodos en los que no se utiliza el sistema y resulta imprescindible usar contenedores criogénicos altamente aislados (García , 2019, p.13).

Otros sistemas de almacenamiento líquido

El uso de disoluciones de borohidruros es otra de las alternativas para el almacenamiento de hidrógeno en medio líquido. En este caso, el hidrógeno se libera a partir de una reacción de hidrólisis catalítica:



La densidad de almacenamiento teórica es de 10,9 % en peso. La principal ventaja que ofrecen estas disoluciones es que permiten una generación de hidrógeno a bordo del vehículo segura y controlable, mientras que la desventaja fundamental consiste en que el producto de la reacción (NaBO₂) tiene que almacenarse para ser descargado del vehículo y ser regenerado a NaBH₄, en un proceso que no puede producirse a bordo. Por otro lado, algunos líquidos orgánicos pueden utilizarse para almacenar indirectamente el hidrógeno en forma líquida. El concepto básico se resume en tres pasos: en primer lugar, el líquido orgánico se deshidrogena siguiendo un proceso catalítico para producir hidrógeno a bordo. En segundo lugar, el producto deshidrogenado se transporta desde el tanque del vehículo hasta una planta central de proceso, mientras se rellena el tanque con el líquido rico en H₂. Finalmente, es necesario re-hidrogenación del líquido deshidrogenado previamente para devolverlo a la estación de

llenado. Un ejemplo típico es el caso del tolueno (C_7H_8) y el metilciclohexano (C_7H_{14}). Con esta técnica se alcanzan densidades de almacenamiento de 6,1 % en peso, pero presenta como principales desventajas, que el hidrógeno sólo se libera a altas temperaturas (300 – 400 °C) y que el uso de estos productos requiere de estudios adicionales relacionados con la seguridad y la toxicidad (García , 2019, p.13).

2.2.3.4 Hidruros recargables

El hidrógeno tiene la propiedad de reaccionar con diferentes metales de transición formando compuestos denominados hidruros. Los hidruros han sido estudiados durante décadas y sus propiedades son bien conocidas. Las reacciones son reversibles en condiciones adecuadas de presión y temperatura y, por tanto, una determinada masa metálica puede ser cargada y descargada un número prácticamente ilimitado de veces y se puede utilizar como depósito de almacenamiento sólido de H_2 . Casi todos los hidruros operan a presiones moderadas, no hay pérdidas y además permiten la limpieza del hidrógeno. El hidrógeno se libera cuando se aplica calor a los materiales, a través, por ejemplo, del calentamiento del tanque y mediante la reducción de la presión. Este tipo de almacenamiento es seguro y manejable y permite almacenar más H_2 por unidad de volumen que con el hidrógeno líquido. Sin embargo, el peso del sistema es elevado como consecuencia de los bajos niveles de retención de H_2 (< 2,5 % en peso). Por tanto, no son adecuados para aplicaciones móviles. Es especialmente útil para aplicaciones estacionarias aisladas y con energía eléctrica procedente de fuentes renovables (García , 2019, p.14).

2.2.3.4.1 Hidruros metálicos

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno sólido en hidruros metálicos se basan en el principio de que ciertos metales en condiciones de alta presión absorben hidrógeno formando hidruros metálicos, de forma que cuando se calientan a baja presión liberan el hidrógeno previamente absorbido. Las ventajas de estos sistemas de almacenamiento radican en que el hidrógeno pasa a formar parte de la composición química del metal y, por tanto, no requieren altas presiones o temperaturas criogénicas para operar. Puesto que el hidrógeno se libera desde el hidruro a bajas presiones, se trata de un sistema de almacenamiento muy seguro (Molina et al., 2021, p.110).

Como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.8, en un depósito lleno de ciertos metales o aleaciones a temperatura constante, la presión aumenta moderadamente al introducir hidrógeno hasta que se alcanza una presión de equilibrio entre las moléculas de hidrógeno gaseoso y los átomos de hidrógeno incorporados en la estructura del sólido. A esta presión de equilibrio, se almacena la máxima cantidad de hidrógeno en el metal. Posteriormente si se sigue introduciendo hidrógeno gaseoso, llega un momento en el que el sólido ya no es capaz de aceptar más átomos de hidrógeno en su estructura y la presión en el depósito aumenta (Molina et al., 2021, p.110).

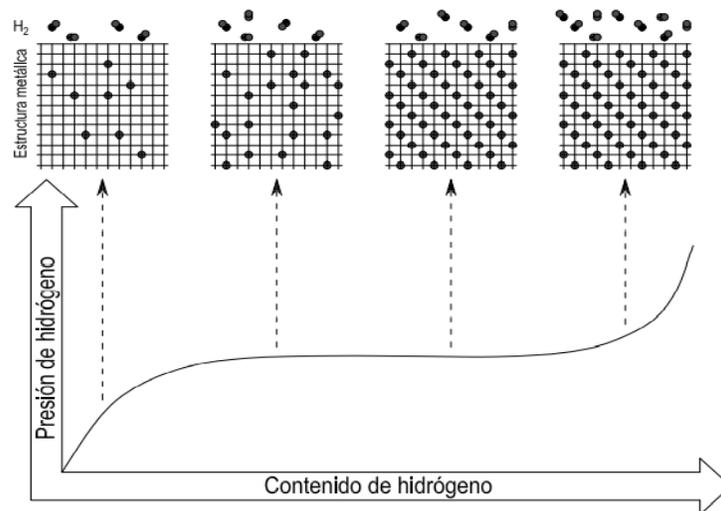


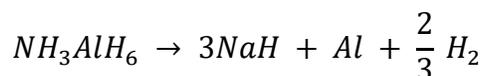
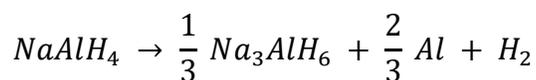
Figura 2.8. Almacenamiento de hidrógeno sólido en forma de hidruros metálicos. Fuente: Molina et al (2021).

Existen muchas clases de hidruros metálicos, aunque casi todos se basan en aleaciones metálicas de magnesio, níquel, hierro y titanio. El proceso de formación de los hidruros a partir de los metales debe ser totalmente reversible y el material debe soportar muchos ciclos de carga/descarga y ser estable frente al oxígeno y la humedad del ambiente. Un aspecto muy importante es la cinética de los procesos de transformación entre el metal y el hidruro, que determina el tiempo que se requiere para llevar a cabo tanto la carga de hidrógeno en el depósito como el caudal y tiempo de respuesta cuando se precisa el hidrógeno en una aplicación concreta (Molina et al., 2021, p.111).

2.2.3.4.2 *Hidruros no metálicos*

El almacenamiento de hidrógeno en forma de hidruros metálicos resulta interesante y atractivo, tanto desde el punto de vista de la seguridad como de la eficiencia, pero presenta la importante limitación del elevado peso final del depósito. Por este motivo, se han desarrollado sistemas de almacenamiento de hidrógeno con otros elementos químicos más ligeros que también son capaces de enlazarse al hidrógeno, en este caso mediante enlaces iónicos o covalentes. Estos materiales pueden llegar a almacenar mucho más hidrógeno por unidad de masa, aunque su principal limitación es que no siempre estos procesos son reversibles, de modo que el ciclo de carga y descarga no es tan sencillo como en el caso de los hidruros metálicos.

El tetrahidroaluminato de sodio o alanato de sodio (NaAlH_4) es capaz de desprender de manera totalmente reversible un 5,6 % de hidrógeno a 200 °C cuando se dopa con pequeñas cantidades de titanio. El hidrógeno se obtiene a partir de dos reacciones consecutivas. En primer lugar, el NaAlH_4 se transforma en Na_3AlH_6 , aluminio e hidrógeno, lo que corresponde a un almacenamiento del 3,7 % de hidrógeno en peso. La presencia de titanio debilita el enlace Al–H en los aniones AlH_4^- , en los que los iones de hidruro se sitúan en los vértices de un tetraedro y el aluminio en el centro. A continuación, se produce la descomposición del Na_3AlH_6 a hidruro de sodio, con la liberación de un 1,9 % de hidrógeno adicional (Molina et al., 2021, p.112)



La descomposición del hidruro de sodio proporcionaría aún más hidrógeno, hasta un total de un 7,4 % en peso, pero se trata de una reacción irreversible que transcurre a temperatura elevada (425 °C), por lo que carece de interés para el almacenamiento de hidrógeno. El ciclo de recarga para regenerar el NaAlH_4 se consigue tras someter la mezcla final de aluminio e hidruro de sodio a una presión próxima a 90 bar de hidrógeno a 100 °C (Molina et al., 2021, p.112).

Por su parte, la reacción entre la amida de litio (LiNH_2) y el hidruro de litio (LiH) podría llegar a proporcionar de manera reversible hasta un 10,4 % en peso de hidrógeno. En una primera etapa, se hace reaccionar LiNH_2 con LiH , obteniéndose imida de litio (Li_2NH) e hidrógeno. A continuación, reaccionan Li_2NH y LiH , obteniéndose nitruro de litio (Li_3N) y más hidrógeno. Como principal inconveniente, se destaca que la temperatura que se requiere para el proceso completo es de unos 400 °C (Molina et al., 2021, p.113).



También se están considerando compuestos de boro para el almacenamiento de hidrógeno, como el tetrahidruroborato de sodio (NaBH_4), que libera hidrógeno en presencia de un catalizador de rutenio y suficiente temperatura. El borazano (NH_3BH_3) puede proporcionar hasta un 15 % en peso de hidrógeno, tanto mediante la descomposición directa del sólido por efecto de la temperatura como por descomposición catalítica en disolución. En la reacción se genera boracina ($\text{B}_3\text{N}_3\text{H}_6$), que se puede eliminar con un soporte poroso de sílice, favoreciendo además la cinética de desorción del hidrógeno. El tetrahidruroborato de litio (LiBH_4) posee un contenido de hidrógeno del 18 %, pero para su síntesis se requieren temperaturas y presiones superiores a 650 °C y 150 bar (Molina et al., 2021, p.113).

Por último, el hidruro mixto de litio y berilio ($\text{Li}_3\text{Be}_2\text{H}_7$) almacena un 8 % en peso de hidrógeno de manera reversible y con una temperatura de desorción de tan sólo 150 °C, siendo su principal limitación que se trata de un compuesto tóxico (Molina et al., 2021, p.113).

2.2.3.5 Hidrógeno sólido

Se utiliza esta denominación para referirse a los sistemas de almacenamiento de hidrógeno formando parte de la composición molecular de un compuesto sólido mediante reacción y/o adsorción.

2.2.3.6 Almacenamiento en sistemas porosos

Otra forma menos desarrollada para el almacenamiento de hidrógeno sólido es mediante adsorción sobre materiales carbonosos como el carbón activo, nanotubos de carbono y nano fibras de grafito. Todos estos materiales presentan microporos y un área superficial extremadamente elevada, de hasta varios centenares de metros cuadrados por gramo, lo que

en teoría permite una gran capacidad de almacenamiento de hidrógeno o cualquier otro gas. En estos materiales carbonosos, el tamaño y cantidad de los poros es sumamente importante y determina la capacidad de almacenamiento de hidrógeno. A diferencia de lo que ocurre en los hidruros, la adsorción de hidrógeno en materiales carbonosos se produce exclusivamente mediante fuerzas electrostáticas que se establecen entre los átomos de carbono y las moléculas de hidrógeno. Se trata, por tanto, de una interacción débil que no afecta a la estructura de los materiales, permitiendo en teoría que la carga/descarga de hidrógeno sea rápida y totalmente reversible. A una temperatura determinada, la cantidad de hidrógeno adsorbida es dependiente de la presión aplicada. Los resultados experimentales alcanzados hasta la fecha relativos a la cantidad de hidrógeno almacenado son dispares, oscilando el porcentaje de hidrógeno adsorbido entre un 1 y un 10 % en peso (Molina et al., 2021, p.114).

2.2.4 Economía del Hidrogeno

El hidrógeno tiene características que le confieren propiedades para ser un elemento renovable capaz de proporcionar energía segura, económicamente competitiva y libre de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). (Solano, 2004, p.167)

Consiste en tomar agua de la naturaleza, separarla en sus componentes (oxígeno e hidrógeno) mediante electricidad de origen renovable, almacenar el hidrógeno, transportarlo, distribuirlo y, finalmente, al utilizarlo siguiendo procesos térmicos convencionales (motores de combustión interna o turbinas), o electroquímicos novedosos (pilas de combustible), devolveríamos a la naturaleza la misma cantidad de agua que previamente habíamos tomado de ella. (Rifkin, 2002, p.471)

En la conversión térmica del hidrógeno se emitirían óxidos de nitrógeno (aunque en una proporción muy inferior a los emitidos con los combustibles fósiles), mientras que en la utilización con pilas de combustible las emisiones serían nulas. (Rifkin, 2002, p.488)

2.2.5 Limitaciones del hidrogeno

El hidrogeno es caro, la economía del hidrógeno necesita tener un costo razonable para que se pueda implementar a nivel mundial. Esto a primera vista parece ser difícil. Al igual que la electricidad, el hidrógeno debe costar más que la fuente de energía de la que se obtuvo. Por lo tanto, el hidrógeno va a costar más que los combustibles fósiles hasta que la energía

alternativa (no fósil) sea más barata que los combustibles fósiles. (Berry & Aceves , 2006, p.7)

Las tecnologías del hidrógeno no están listas para su implementación a gran escala las tecnologías necesarias para la economía del hidrógeno no tienen la suficiente madurez para su uso comercial a nivel mundial. La economía del hidrógeno requiere de componentes producidos en masa con bajos costos y altos niveles de seguridad. (Berry & Aceves , 2006, p.8)

Si el principal desafío en el uso del hidrógeno como combustible es su obtención y extracción, el segundo principal desafío es saber cómo almacenarlo. Cuando se han tratado las características del hidrógeno, hemos visto que, de todos los elementos conocidos, tiene la menor densidad de gas y el segundo punto de ebullición más bajo, con lo que supone un reto a la hora de almacenarlo tanto en formato gaseoso como líquido. (Ramos, 2009, p.88)

2.2.6 Aprovechamiento del hidrógeno

2.2.6.1 Materia prima

La producción de hidrógeno ha ido incrementándose en estos últimos años hasta 100-120 MT de 2019, 70 de las cuales, producidas en su forma pura, según datos de la Agencia Internacional de la Energía. De la demanda actual de hidrógeno, dos terceras partes se emplean en la fabricación de amoníaco, como fertilizante nitrogenado y otros productos químicos, así como en la industria del refino del petróleo para la producción de combustibles (Tomante et al., 2020, p.160).

2.2.6.2 Refinerías

El hidrógeno se utiliza en distintos procesos de las refinerías, entre los cuales el hidrotratamiento es uno de los más importantes, con la finalidad de eliminar los productos nocivos para el medio ambiente. El proceso consiste en la adición de hidrógeno para inducir las reacciones de hidrogenación e hidrogenólisis, saturando los compuestos aromáticos o eliminando elementos como el azufre, el nitrógeno o los metales (Morante, Andreu, García, Guilera, Tarancon, & Torell, 2020, p.160).

2.2.6.3 Metalurgia

La reducción directa del hierro (DRI, por sus siglas en inglés) es el método de obtención de acero a partir de la mena del hierro -es decir, óxidos de hierro como la magnetita o hematita empleando un agente reductor sólido (carbón) o gaseoso (hidrógeno, gas de síntesis) a temperaturas significativamente inferiores a los altos hornos tradicionales (800-1.200 °C). Este método constituye actualmente la cuarta fuente de demanda de hidrógeno (4 MT H₂ anuales), representando un 3 % del consumo total, ya sea en forma pura o como mezcla de gases. Teniendo en cuenta el crecimiento global y la necesidad de nuevas infraestructuras en los países en desarrollo, se estima que la demanda de acero aumentará un 6 % hasta el 2030. Dado que el sector del acero es uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero, el interés por los procesos de reducción directa acompañando los procesos de horno de arco eléctrico continua en aumento -teniendo en cuenta las fuentes de energía renovable disponibles-, lo que contribuye a la electrificación del sector metalúrgico. Se estima que se requieren 100 kg de hidrógeno para producir 1 tonelada de acero (Tomante et al., 2020, p.167)

2.2.6.4 Metanol

El metanol es un producto químico básico, que se fabrica a gran escala para satisfacer los mercados globales. Es el alcohol más simple y se encuentra en fase líquida a temperatura ambiente. Se utiliza como disolvente, anticongelante y como precursor de muchas otras sustancias de interés industrial, como el formaldehído, el ácido acético, el metil terbutil éter, el dimetil éter y otros productos químicos.

El proceso de síntesis de metanol consiste en la reacción de gas de síntesis, con una estequiometría de dos moles de hidrógeno por cada mol de monóxido de carbono. La reacción tiene lugar en presencia de un catalizador, habitualmente en base cobre y óxidos de cinc, a muy altas presiones de 50-100 atm, y a temperaturas moderadas de 250°C. El dióxido de carbono presente en el gas de síntesis también reacciona con tres moléculas de hidrógeno para dar lugar a metanol (Tomante et al., 2020, p.170).

2.2.6.5 Hidrocarburos sintéticos

Los hidrocarburos sintéticos se definen como combustibles basados en hidrógeno que son líquidos a temperatura ambiente. También se les denomina electrocombustibles y los compuestos que se proponen son en forma de metanol, gasolina, queroseno, diésel ligero (transporte terrestre), y diésel pesado (transporte marítimo) (Tomante et al., 2020, p.172).

2.2.6.6 Productos químicos

Los dos productos químicos básicos más importantes que se obtienen a partir de hidrógeno son el amoníaco (55 %) y el metanol (10 %), además de todos los compuestos orgánicos que se producen en las refinerías mediante reacciones de hidrogenación expuestos con anterioridad (25 %). El hidrógeno también se utiliza como materia prima para otros productos químicos básicos inorgánicos (Tomante et al., 2020, p.174).



Figura 2.9. Vías de producción de compuestos químicos a partir de hidrógeno. Fuente: Tomante et al (2020)

2.2.6.7 Polímeros

Procesos alternativos para la fabricación de plásticos neutros en carbono se basan en la reacción de Fischer-Tropsch, en la que el monóxido de carbono se combina con hidrógeno para generar moléculas más complejas, como las olefinas. Los productos que requieren de hidrógeno se denominan químicos sintéticos; en este caso, plásticos sintéticos. Para dirigir el producto hacia olefinas, en lugar de hidrocarburos sintéticos, es necesario aumentar la temperatura de la reacción ligeramente por encima de los 300°C y utilizar catalizadores basados en hierro. Los procesos indirectos de obtención de olefinas a partir de gas de síntesis se basan primero en la generación de metanol, alcoholes, hidrocarburos sintéticos o dimetiléter como paso intermedio; y posteriormente se obtienen las olefinas. El proceso de producción de olefinas mediante metanol es comercial y utiliza zeolitas como catalizadores (Tomante et al., 2020, p.176).

2.2.6.8 Transporte y movilidad

El hidrógeno es uno de los tres vectores energéticos para descarbonizar el transporte, compitiendo y complementándose con el gas natural vehicular (GNC y GNL), los biocombustibles (como el biometano), el gas natural vehicular u otros, generados a partir de hidrógeno verde y captura de CO₂, y la electrificación.

Comparado con la electrificación, el hidrógeno supera las limitaciones de autonomía y elevados tiempos de recarga asociados a los vehículos eléctricos a batería.

Comparado con los biocombustibles, evita el uso de grandes extensiones de terreno y el impacto en la calidad del aire, especialmente en las zonas urbanas de elevada concentración de población. (Tomante et al., 2020, p.177)

2.2.6.9 Transporte ferroviario

El potencial de futuro del tren con pila de combustible de hidrógeno se encuentra en las nuevas rutas o en rutas no electrificadas. Es difícil imaginar que el tren de hidrógeno vaya a sustituir los miles de km de transporte ferroviario electrificado que ya existen, pero sí supone una oportunidad para generar nuevas rutas a un coste más económico que la electrificación, como en zonas urbanas (Tomante et al., 2020, p.187).

2.2.6.10 Generación de calor

2.2.6.10.1 Doméstica. El uso residencial de pilas de combustible se basa principalmente en los sistemas de cogeneración de electricidad y calor conocidos como sistemas CHP (Combined Heat and Power) y, más concretamente, como micro-CHP cuando se trata de sistemas domésticos por debajo de los 20 kW. Estos sistemas presentan elevadas eficiencias comparados con sistemas de combustión, tienen cierta flexibilidad de combustible y destacan por ser completamente silenciosos. Los micro CHP están típicamente basados en tecnología PEM o SOFC, a diferencia de los sistemas CHP industriales que utilizan tecnología SOFC, PAFC o MCFC (Tomante et al., 2020, p.193).

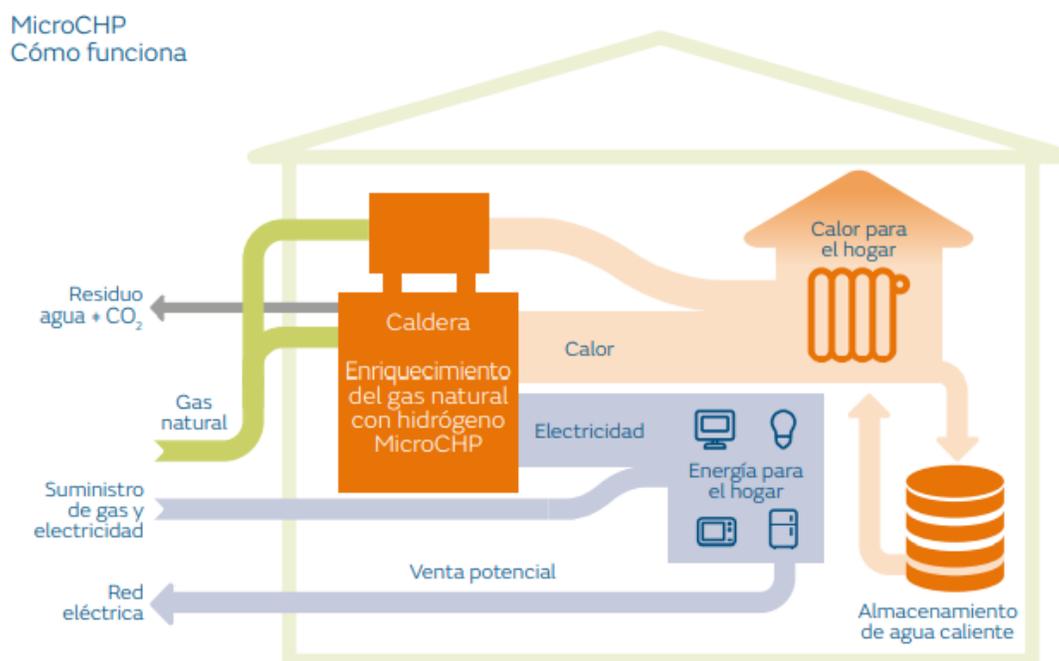


Figura 2.10. Uso residencial de pilas de combustible de hidrógeno en sistemas de cogeneración de electricidad y calor. Fuente: Tomante et al (2020)

2.2.6.10.1 Industrial. Teniendo en cuenta que el hidrógeno se puede quemar o emplear en pilas de combustible, es una fuente de calor alternativa libre de emisiones. El hidrógeno se puede quemar para producir calor de elevada calidad sin emisiones de CO₂. En presencia de aire, la combustión alcanza una temperatura de llama de 2.100 °C, que asciende

a 2.800 °C con oxígeno puro. No obstante, la reacción de combustión es muy rápida y se deben ajustar los parámetros.

Aunque actualmente hay pocas aplicaciones que empleen hidrógeno puro como fuente de calor industrial, ya existen aplicaciones donde se quema hidrógeno conjuntamente con gas natural en calderas, estufas y motores (Tomante et al., 2020, p.197).

2.2.7 Electrólisis

Como se dijo anteriormente, la electrólisis es el proceso por el cual se descomponen los elementos de una sustancia mediante el paso de una corriente eléctrica. Los fundamentos de la electrólisis están regidos bajo las tres leyes de Faraday de la electrólisis.

2.2.7.1 Leyes de la electrólisis

Las leyes que enunció Faraday fueron las siguientes:

- 1) *La masa de una sustancia liberada en una electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado a través del electrolito* (Sancler, 2022)

$$m = EQ = EIt$$

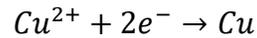
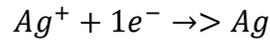
Siendo

- $m \equiv$ masa de sustancia liberada o de electrolito descompuesto
- $Q \equiv$ cantidad de electricidad
- $I \equiv$ la intensidad de corriente
- $t \equiv$ el tiempo transcurrido.
- $E \equiv$ Constante de proporcionalidad, es característica de cada sustancia y se denomina equivalente electroquímico, y es la cantidad de electrolito descompuesto o de sustancia liberada por 1 culombio de electricidad.

La primera parte no es difícil de comprender. Una corriente de mucha intensidad que circule a través del electrolito durante mucho tiempo depositará más sustancia que una corriente débil que actúe durante un tiempo corto.

- 2) *Las masas de diferentes sustancias producidas por el paso de la misma cantidad de electricidad, son directamente proporcionales a sus equivalentes gramos.* (Sancler, 2022)

Si hacemos pasar la misma corriente a través de tres cubas electrolíticas conectadas en serie, conteniendo respectivamente los cationes Ag^+ + Cu^{2+} y Al^{3+} , en los cátodos de cada una de las cubas se producirán las reducciones siguientes



Si la cantidad de electricidad que pasa es $6,02 \cdot 10^{23}$ electrones (1 mol de electrones), se depositarán: $6,02 \cdot 10^{23}$ átomos de Ag = 1 mol de Ag = 1 eq-g de Ag

$$\frac{602 \cdot 10^{23}}{2} \text{ átomos de Cu} = \frac{1}{2} \text{ mol de Cu} = 1 \text{ eq-g de Cu}$$

$$\frac{602 \cdot 10^{23}}{3} \text{ átomos de Cu} = \frac{1}{3} \text{ mol de Cu} = 1 \text{ eq-g de Cu}$$

El paso de 1 mol de electrones a través de una disolución es capaz de liberar 1 equivalente-gramo de sustancia.

La carga correspondiente a 1 mol de electrones es:

$$6.02 \cdot 10^{23} \frac{\text{electrones}}{\text{mol}} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{C}}{\text{electrón}} = 96500 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$$

Y recibe el nombre de constante de Faraday (F)

$$1 F = 96500 C$$

Se define como Faraday a la cantidad de electricidad necesaria para depositar por electrólisis 1 equivalente gramo de cualquier sustancia, de donde se deduce

$$E = \frac{p_{eq}}{96500}$$

siendo P_{eq} el peso equivalente de la sustancia depositada. Combinando las expresiones matemáticas correspondientes a las dos leyes de Faraday, se obtiene:

$$m = \frac{p_{eq} \cdot I \cdot t}{96500}$$

La segunda parte dice que cuando la misma corriente circula durante el mismo tiempo, las cantidades de sustancia depositadas dependerán de su peso equivalente. El peso equivalente de una sustancia es el número de unidades de peso de una sustancia que se combinarán con una unidad de peso de hidrógeno. En una molécula de agua, dos moléculas de hidrógeno, cada una de las cuales pesa una unidad, se combinan con un átomo de oxígeno, que pesa dieciséis unidades. De modo que, si dos unidades de hidrógeno se combinan con dieciséis unidades de oxígeno, una unidad de hidrógeno lo hará con ocho unidades de oxígeno. El peso equivalente del oxígeno es, entonces, ocho, de manera que durante la electrólisis del agua se libera, en peso, ocho veces más oxígeno que hidrógeno. Cuanto mayor sea el peso equivalente de un elemento, tanto mayor será el peso de él, que se depositará durante la electrólisis. Este fenómeno se aplica actualmente en la galvanoplastia y la extracción y purificación de algunos metales (Sancler, 2022).

2.3 Hipótesis

Existe una relación entre los parámetros químicos y los parámetros físicos tales como la disolución usada como electrolito y su concentración, la densidad de corriente consumida por el generador, la temperatura y el caudal gas producido.

Capítulo 3

3.1 Diseño metodológico

3.1.1 Tipo de estudio

De acuerdo con el paradigma epistemológico de la investigación en este estudio se manipulan de forma intencionada las variables independientes en diversos niveles de la experimentación, se verifica la hipótesis a través de métodos estadísticos inferenciales, por tanto, el paradigma sobre el que se sustenta esta investigación es el paradigma positivista.

Según el enfoque filosófico de la investigación el estudio es cuantitativo, cada etapa precede a la siguiente y no se puede “brincar” o eludir pasos, tiene que ver con la “cantidad” y, por tanto, su medio principal es la medición y el cálculo. En general, busca medir variables con referencia a magnitudes.

Según el nivel de profundidad del conocimiento el estudio puede definirse en tres niveles: exploratorio, descriptivo y correlacional. Es exploratorio porque aborda un tema relativamente poco estudiado en el país. Es descriptivo ya que busca especificar propiedades y características del fenómeno que se estudia y es correlacional porque tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más variables en una muestra o contexto en particular.

Acorde al método de investigación el estudio es experimental, porque se provocan manipulaciones de una o más variables independientes, observando los cambios en efectos de variables dependientes, orientando hacia el futuro.

Según el tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de información el estudio es prospectivo, ya que los hechos se registran a medida que ocurren.

Según el período y secuencia del estudio es transversal, ya que se estudian las variables y se analiza su incidencia e interrelación.

3.1.2 Área de estudio

La investigación se realizó en el municipio de Estelí, departamento de Estelí.

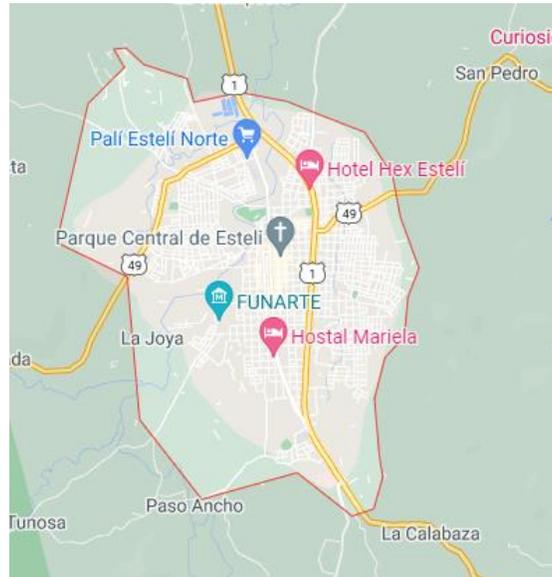


Figura 3.1. Ubicación geográfica ciudad de Estelí

3.1.3 Área de conocimiento

La presente investigación se inscribe a la línea IIC-1: Innovación, Tecnología y Medio Ambiente. Sub línea IIC-1.1: Energía Renovable, aprobado por el Consejo Universitario de UNAN Managua, en sesión 14-2021, del 09 de julio de 2021.

3.1.4 Universo y muestra

Tamayo y Tamayo (2004), define el universo como un conjunto o la totalidad de un grupo de elementos, casos u objetos que se quiere investigar. En esta investigación se trata la evaluación de los parámetros técnicos del sistema de electrolisis alcalina, por lo cual el universo es dicho prototipo.

Dado que esta investigación se realiza por método experimental, su espacio inferencial representativo se constituye de la siguiente manera: el número de repeticiones por cada tratamiento, se multiplica por el número de tratamientos y eso equivale al tamaño de muestra de un estudio experimental. Este principio está basado en la función de distribución de

probabilidad de la Prueba de Fisher, que se define en el escenario de las muestras pequeñas donde “n” debe ser igual o menor de 30.

En este experimento la muestra representativa se circunscribe al espacio inferencial representativo que le corresponde definido por el número de repeticiones y el número de tratamientos, de los cuales contará cuatro repeticiones para determinar la corriente, la tensión, la temperatura y el caudal de gas producido.

3.1.5 Matriz de operacionalización de variables

Tabla 3.1 Operacionalización de variables

Objetivos Específicos	Variable conceptual	Subvariables o dimensiones	Variable operativa indicadores	Técnicas de recolección de datos e información
Describir funcional y constructivamente el sistema de electrólisis alcalina	Aspectos funcionales y constructivos	Características constructivas	-Materiales -Dimensiones	-Planos -Modelado 3D -Ficha de materiales -Diagrama de bloques
		Características funcionales	-Principio de funcionamiento	
Determinar la relación entre las variables físico-químicas que intervienen en el proceso de electrólisis de la celda.	Variables físico-químicas	Variables físicas	-Corriente -Tensión -Potencia -Caudal de gas -Eficiencia	Experimento de laboratorio
		Variables químicas	-Sustancia -Concentración de electrolito	
Calcular la eficiencia energética de la celda	Eficiencia energética	Eficiencia eléctrica Eficiencia térmica	-Producción de gas -Energía eléctrica consumida -Voltaje reversible	Algoritmo de cálculo

<p>Comparar teóricamente las diferentes tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis</p>	<p>Tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis</p>	<p>Electrolizador alcalino Electrolizador de membrana polimérica Electrolizador de óxido sólido</p>	<p>-Electrolito -Portador de carga -Densidad de corriente -Voltaje -Temperatura de operación -Presión de trabajo -Eficiencia eléctrica</p>	<p>Revisión bibliográfica</p>
---	--	---	--	-------------------------------

3.1.6 Métodos, técnicas e instrumentos de recopilación de datos e información

Para la recopilación de datos e información se emplearán diversos métodos relacionados con cada objetivo de la investigación.

Se realizará una revisión bibliográfica para comparar las diferentes tecnologías de generación de hidrógeno y se hizo uso de una ficha comparativa.

Para el diseño del prototipo se utilizaron programas de diseño 3D y 2D asistido por computadora, en concreto los softwares AutoCAD 2017, Sketchup, Blender e Inventor.

Para determinar la relación entre las variables físico-químicas de la electrolisis aplicada al prototipo, se realizarán experimentos de laboratorio, el método empleado será la experimentación. Se empleará una ficha de recolección de datos.

Para el cálculo de la eficiencia eléctrica se realizó un algoritmo de cálculo basado en ecuaciones encontradas en bibliografía.

3.1.7 Procedimientos para la recolección de datos e información

El procedimiento que se seguirá para la recolección de los datos e información se presentan de acuerdo con cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

Descripción constructiva y funcional del prototipo de sistema de electrólisis alcalina

El procedimiento para la obtención de los parámetros de diseño del prototipo se realizó de la siguiente manera:

Primeramente, se realizó una consideración de las tecnologías disponibles y se seleccionó la opción más apropiada en cuanto a la disponibilidad de recursos. Seguidamente se determinaron las dimensiones del prototipo y los materiales a utilizar.

Luego se realizaron planos de cada pieza y del conjunto con sus respectivos cortes y vistas haciendo uso del software de dibujo AutoCAD 2021 e Inventor 2021. Dichos planos fueron exportados al software Sketchup 2021 para realizar el modelado de las piezas por separado a partir de estos, y posteriormente se realizó el modelado del conjunto, aplicación de texturas y animación en el software Blender v2.93.

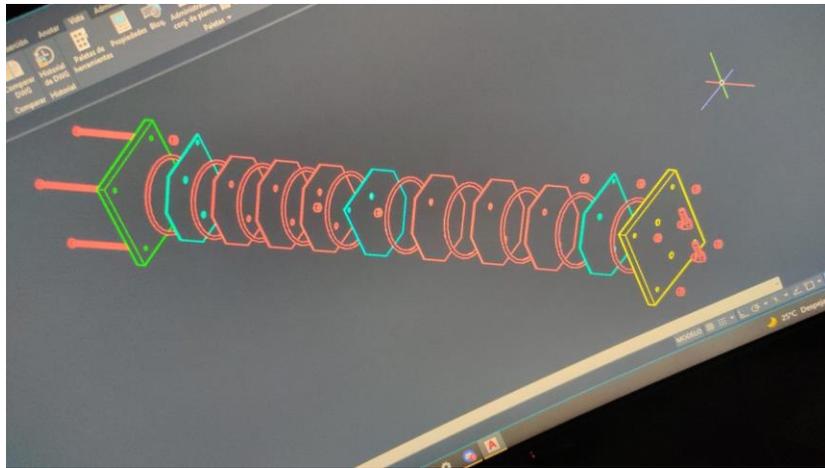


Figura 3.2 Diseño asistido por computadora del prototipo

Relación entre las variables físico-químicas que intervienen en el proceso de electrólisis de la celda.

El procedimiento para la recolección de datos se dio de la siguiente manera:

Primeramente, se realizó la construcción física de la unidad experimental tomando en cuenta las dimensiones y materiales anteriormente establecidos.

Para la experimentación, el prototipo fue provisto de diversos equipos de medición, a saber, un multímetro, un amperímetro, y un termómetro electrónico, los cuales permitieron la medición de la corriente, la tensión parcial de placas, la tensión total y la temperatura. En adición, se dispuso de un flujómetro para la medición del caudal.



Figura 3.3 Disposición del prototipo para la realización de pruebas

Se realizaron diversas pruebas manipulando la tensión, las sustancias de la disolución, y la concentración de esta, mientras se midieron simultáneamente las demás variables. Además, se modificaron las sustancias de la disolución del electrolito, realizando pruebas con agua del grifo y disoluciones de hidróxido de sodio (NaOH) a concentraciones de 10%, 15% y 20%.



Figura 3.4 Preparación del electrolito

La primera prueba se realizó empleando solamente agua, mediante el uso de una fuente DC de laboratorio se realizó un barrido de la tensión desde 2 V a 20 V con incrementos de 2V.

Las siguientes tres pruebas se realizaron empleando las disoluciones de diferentes concentraciones de hidróxido de sodio. Se realizó un barrido de la tensión desde 1V a 10V, con incrementos de 1 V.

Para estudiar la relación entre la temperatura y la corriente, se realizó una prueba estableciendo una tensión fija de 9V empleando como electrolito NaOH al 20%, se midieron estas variables cada 10 segundos hasta que se lograra una estabilización.

Cálculo de la eficiencia eléctrica de la celda de electrólisis

Para determinar la eficiencia se registraron los datos obtenidos en la experimentación, se realizaron cálculos matemáticos en función del voltaje entre placas y el voltaje termoneutro según el procedimiento encontrado en bibliografía. El algoritmo de cálculo se encuentra más detallado en el Capítulo 4.

Comparación teórica de las tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis

El proceso de recopilación de información se realizó a través de una revisión de bibliografía disponible. Se acudió a fuentes como artículos de revistas, libros, trabajos de investigación, material multimedia, páginas web, documentos de sitios web entre otros. Luego de la revisión bibliográfica se realizó un resumen de los aspectos más importantes referentes al tema y se

concluyó en una ficha comparativa de las diferentes tecnologías y los resultados obtenidos en la experimentación.

3.1.8 Plan de tabulación y análisis estadístico

Para el registro de las variables cuantitativas se utilizaron tablas en el software Microsoft Excel, y posteriormente se realizaron los análisis estadísticos pertinentes.

Así mismo, se realizaron los análisis inferenciales específicos o prueba de hipótesis, de acuerdo al compromiso establecido en el objetivo específico tres, tal como: el Análisis de Varianza Invariado (ANOVA), análisis de Covarianza (ANCOVA) y el test de Fisher (prueba de LSD). De igual forma, se realizaron para las variables pertinentes, análisis de Correlación Pearson (ANACORR) y el análisis de regresión lineal y no lineal. Los análisis inferenciales antes descritos, se realizaron utilizando los softwares estadísticos Infostat v.2020 y Minitab 2020 para Windows y, de acuerdo a los procedimientos estadísticos descritos por Pedroza y Dicoskiy, (2006).

Capítulo 4

4.1 Resultados y discusión

4.1.1 Descripción funcional y constructiva del sistema de electrolisis alcalina

El prototipo diseñado consta de tres bloques funcionales diferentes, el electrolizador, el reservorio y el burbujeador. Cada uno cumple una función diferente en el sistema y es descrito con detalle a continuación. Los planos con medidas exactas de cada conjunto y de cada pieza no normalizada se encuentran en Anexos.

4.1.1.1 *Electrolizador*

El electrolizador o la celda electrolítica (Figura 4.1) es el componente fundamental del sistema, la celda consiste en un conjunto de 9 placas de acero 316L de 1.8mm de espesor dispuestas de forma intercalada con separadores de caucho. De estas 9 placas se diferencian 3 placas polares y 6 placas neutras. Estas placas constan de dos orificios ubicados verticalmente uno del otro, el de la parte inferior para la entrada de agua con electrolito y el superior para la salida de gas.

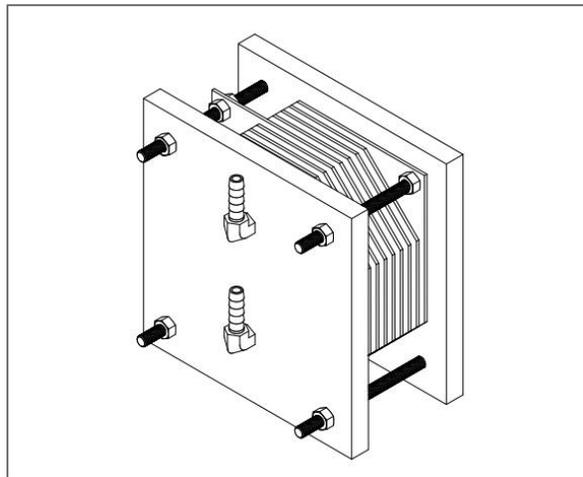


Figura 4.1. Electrolizador.

Las placas polares son las encargadas de recibir la tensión de la fuente de alimentación y las placas neutras permiten que la tensión de entrada se divida entre ellas, ya que, según la bibliografía, la producción de hidrógeno depende mayoritariamente del flujo de corriente y

no de tensiones más allá de 1.48 V el cual es la tensión parcial de placas necesaria para que se dé la disociación de la molécula del agua.

Número de placas polares	3
Número de placas neutras	6
Separación entre placas	4 mm
Área utilizable	314 cm ²

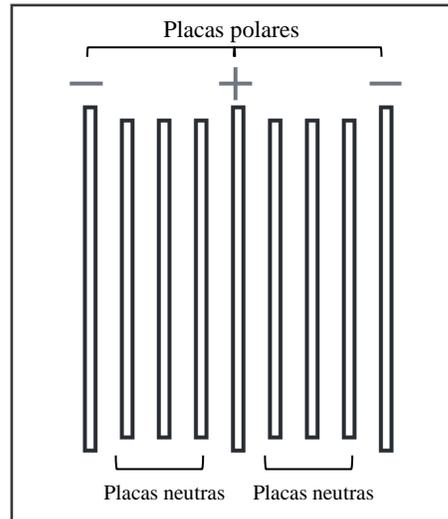


Figura 4.2. Representación esquemática de las placas

Las placas de acero inoxidable y los separadores están limitados y sujetos por las placas de sujeción, las cuales están fabricadas de PVC de 12mm de espesor. Su función es la de realizar presión, con ayuda de los pernos de montaje y las tuercas de sujeción, al conjunto de placas y separadores, para lograr un conducto cerrado cuya área está determinada por el área del círculo interior de los separadores. Una de las placas de sujeción tiene orificios los cuales coinciden con los orificios de las placas de acero, los cuales tienen la función de salida de gas y entrada de agua mediante conectores para manguera.

4.1.1.2 Reservorio

El reservorio (Figura 4.4) está hecho de Tubo PVC de 3 pulgadas, tiene un adaptador y una tapa de alta presión, cerrado herméticamente para evitar las fugas de gas, y de electrolito, este tiene la función es mantener un balance entre consumo y generación, mantiene un flujo constante del electrolito haciendo que la producción de gas sea ininterrumpida. Además, permite una última protección en caso de retroceso de llama al utilizarse el gas para producir calor (llama).

4.1.1.3 *Burbujeador*

El burbujeador (Figura 4.3) está hecho de tubo PVC de 2 pulgadas, consta de dos tapones y un adaptador, es un dispositivo de protección y purificación del gas, cerrado de manera hermética para evitar las fugas, funciona como una válvula antirretorno de la llama, evitando que en el caso de un fallo los demás dispositivos no se vean afectados. Además, el burbujeador tiene la función de purificar el gas de salida atrapando los vapores de hidróxido de sodio que puedan salir del reservorio.

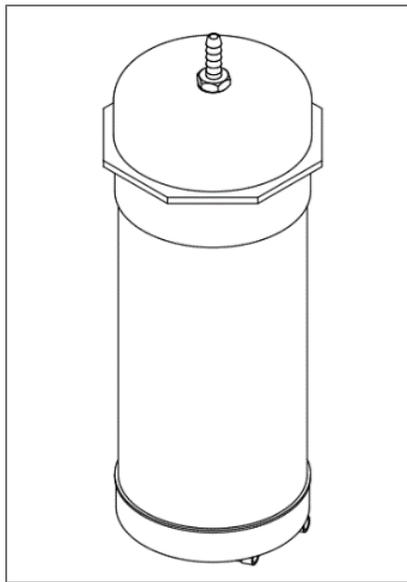


Figura 4.4 Reservorio

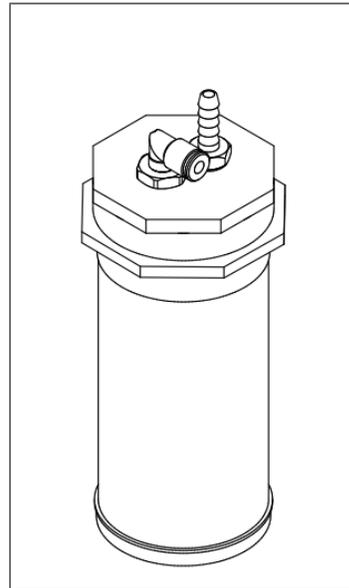


Figura 4.3 Burbujeador

4.1.1.4 *Configuración del sistema*

La celda de electrólisis está conectada a una fuente de corriente continua, la cual proporciona la energía necesaria para realizar la electrólisis.

El agua con electrolito que entra hacia el electrolizador proviene del reservorio y el gas que sale pasa por este mismo, permitiendo que a medida que salga el gas, se cree un vacío del lado de la salida de agua del reservorio y este alimente constantemente a la celda, mientras el gas sube y se acumula para pasar con una mayor presión a su siguiente etapa.

El gas que sale del reservorio es dirigido a la entrada del burbujeador, el cual purifica el gas y brinda una protección contra retroceso de llama. Este está lleno de agua hasta cierto nivel

con una manguera que se introduce hasta la parte final de su base para que el gas pase primero por el agua y si existe un retroceso de llama se dé una explosión sea contenida en el volumen que el gas ocupa en el burbujeador. En la Figura 4.5 se muestra la configuración del sistema descrita.

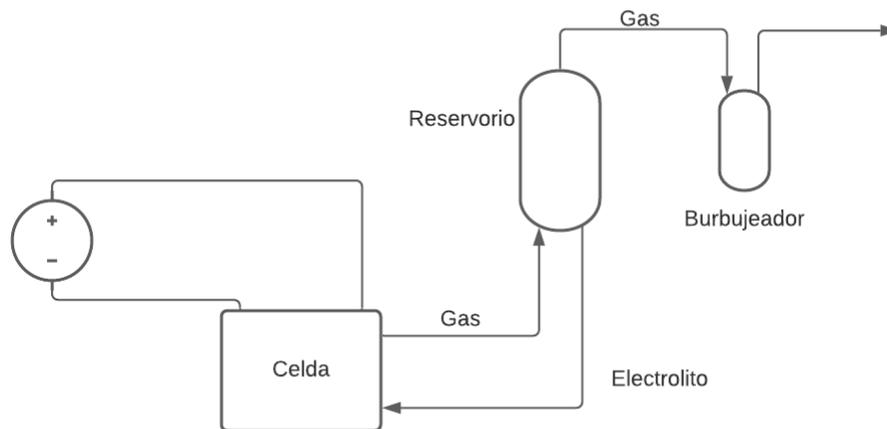


Figura 4.5. Diagrama de bloques del sistema

En la Figura 4.6 se muestra el equivalente eléctrico de la conexión de las placas, esta es una aproximación ideal para fines explicativos, la cual desprecia la resistencia propia de los electrodos, la resistencia de los conductores y otras resistencias que son causa de pérdidas.

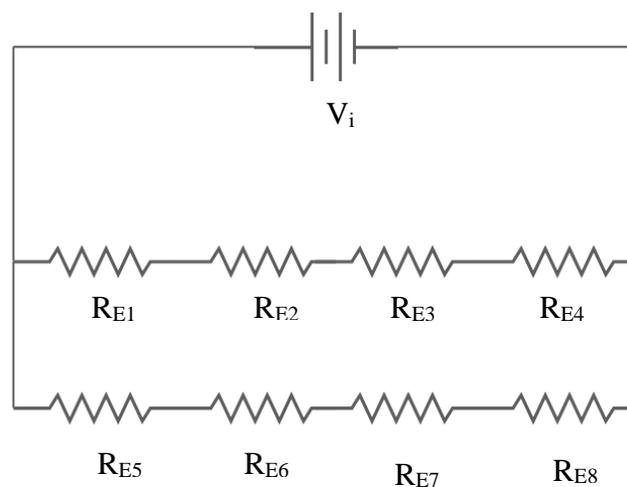


Figura 4.6 Equivalente eléctrico de las placas

En la representación las resistencias R_{E1} , R_{E2} , ... R_{E8} , corresponden al espacio entre las placas neutras y polares, el cual esta lleno de electrolito y es donde se da lugar la electrólisis. Cuatro de estas estan puestas en serie, y dividen el voltaje de entrada V_i entre cuatro, las otras cuatro tambien estan puestas en serie entre sí, dividiendo el voltaje de entrada, pero además están en paralelo con la primera serie de resistencias.

4.1.1.5 *Materiales*

En la Tabla 4.1, se muestra una lista de los materiales empleados por cada elemento del sistema:

Tabla 4.1. Lista de materiales

Designación	Cantidad	Norma
Celda		
Placa polar	3	
Placa neutra	6	
Placas de fijación	2	
Conectores tipo espiga codo 1/4 npt 1/4 ID	2	
Perno de hilo cabeza hexagonal 1/4	4	SAE J429
Tuerca hexagonal 1/4	8	SAE J995
Arandelas plana 1/4	8	ASTM A563
O Rings	11	DIN 3771
Reservorio		
Tubo de 3 pulgadas	1	UNE-ISO 16422
Tapa de tubo de 3 pulgadas	1	UNE-ISO 16422
Tapa hembra de 3 pulgadas	1	UNE-ISO 16422
Conector macho de 3 pulgadas	1	UNE-ISO 16422
Conectores tipo espiga codo 1/4 npt 1/4 ID	2	
Conector tipo espiga 1/4 npt 1/4 ID	1	
Burbujeador		
Tubo de 2 pulgadas	1	UNE-ISO 16422
Conector pvc hembra de 2 pulgadas	1	UNE-ISO 16422
Tapa pvc macho 2 pulgadas	1	UNE-ISO 16422
Conector tipo espiga 1/4 NPT 1/4 ID	1	
Conector codo macho giratorio 1/8 NPT 1/4 OD	1	
tapa de tubo de 2 pulgadas	1	UNE-ISO 16422

4.1.2 Relación entre las variables fisicoquímicas que intervienen en el proceso de electrolisis de la celda

4.1.2.1 *Curvas de polarización de la celda*

Mediante la medición simultánea de la corriente y la tensión y el registro de datos se obtuvieron gráficos de dispersión los cuales corresponden a las curvas de polarización de la celda para cada sustancia y concentración empleada.

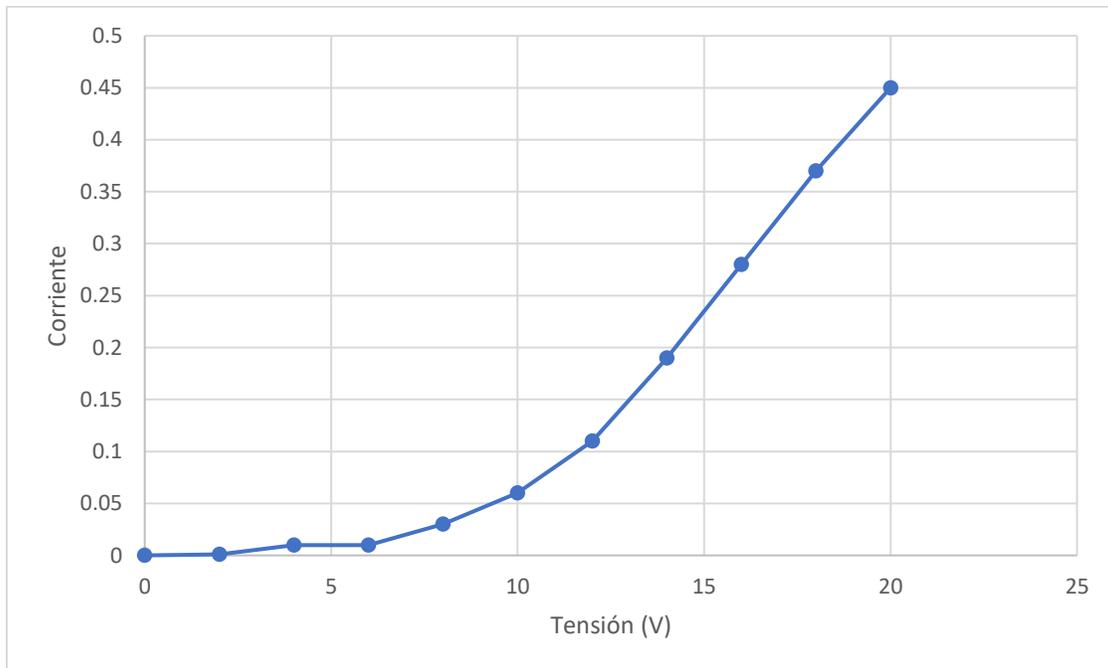


Figura 4.7. Curva de polarización H₂O

La curva de polarización con agua (Figura 4.7) indica que a medida que aumenta la tensión, aumenta la corriente de forma no lineal, sin embargo, a proporción muy baja. Esto ocurre, debido a la baja conductividad eléctrica del agua pura, lo cual retrasa el proceso de electrólisis.

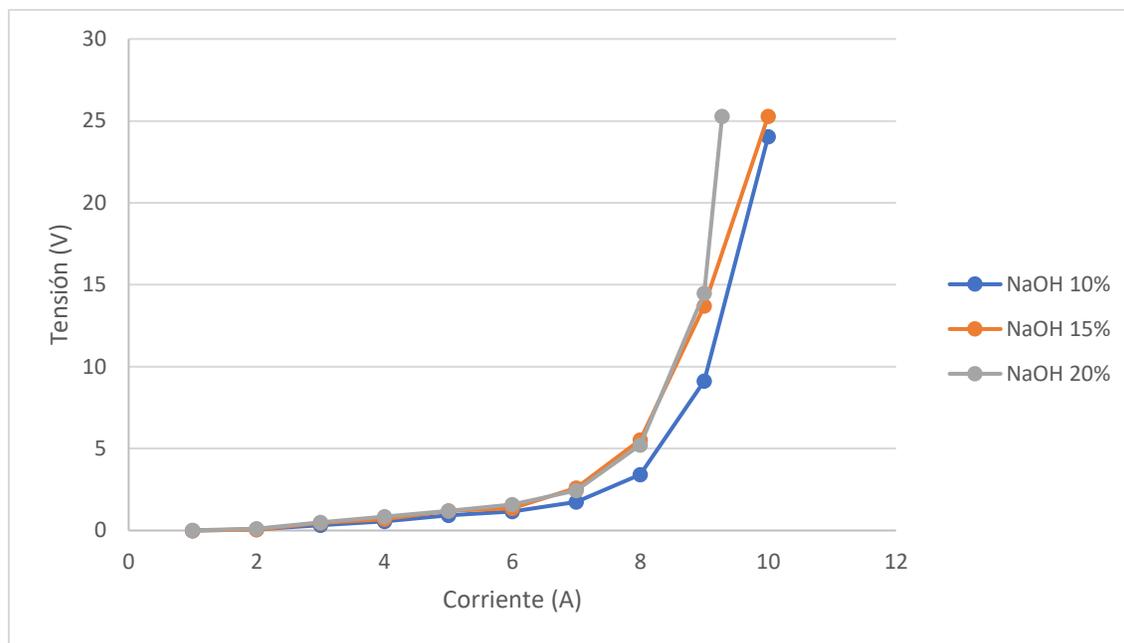


Figura 4.8. Curva de polarización con NaOH a distintas concentraciones

Las curvas de polarización mostradas en la Figura 4.8 revela que, mediante la utilización de un electrolito, como en este caso, hidróxido de sodio a diversas concentraciones masa-volumen, se obtiene una corriente que aumenta exponencialmente a medida que el voltaje aumenta, lo cual acelera el proceso de electrolisis y aumenta la producción de gas. Puede observarse que para tensiones del orden de los 10 V se pueden obtener corrientes de hasta 25 A.

Se puede apreciar que estas curvas presentan pequeñas diferencias en cuanto al crecimiento exponencial de la corriente respecto a la tensión. En cuanto a la disolución al 10% es la que más lento crece exponencialmente, mientras que la disolución al 20% es la que crece con mayor rapidez.

4.1.2.2 Serie temporal temperatura-corriente

Un dato de relevancia encontrado mediante la experimentación fue el aumento de la corriente junto a un aumento de la temperatura en función del tiempo de operación de la celda, ambas variables aumentaron linealmente, hasta lograr una estabilización alrededor de los 1000 segundos. Es importante considerar esto ya que implica que la celda pasa por un período transitorio para alcanzar un régimen permanente tras cierto tiempo, al momento que la temperatura y la corriente de operación se estabilizan.

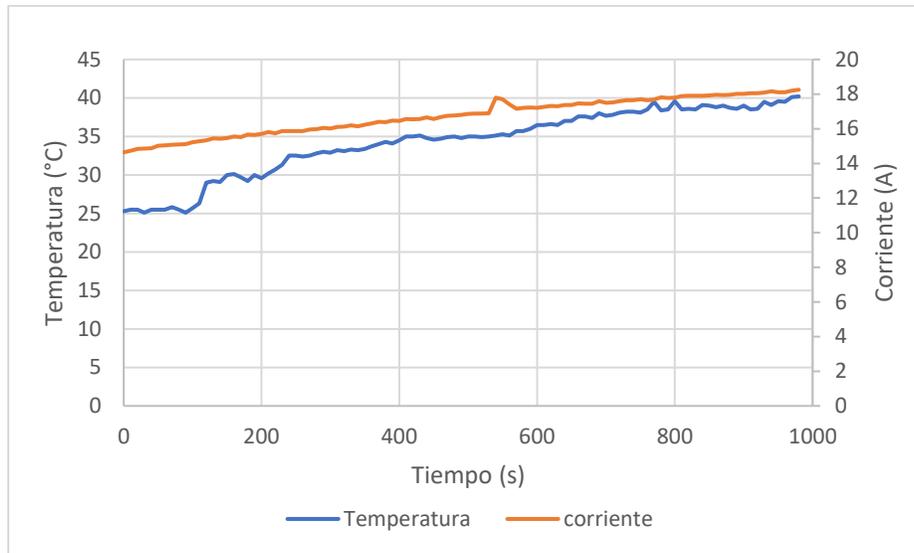


Figura 4.9. Serie temporal temperatura - corriente

En la Figura 4.9 se puede apreciar que existe un aumento de la temperatura a la par de un aumento de la corriente a medida que avanza el tiempo. Mediante esta experiencia se puede también deducir que puede existir una correlación entre ambas variables, lo cual es analizado más adelante.

4.1.2.1 ANOVA

Antes de realizar el análisis de la varianza y de la covarianza, se hizo el diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos. Para tal efecto, se obtuvieron previamente las variables RDUO de las variables y PRED. A partir de los residuos y sus transformaciones se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 4.2. Analisis de ANCOVA para la variable corriente, con covariable tensión

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo	604.31	4	151.08	4.06	0.0083	
Tratamiento	487.06	3	162.35	4.37	0.0103	
Tensión	435.85	1	435.85	11.72	0.0016	0.87
Error	1301.59	35	37.19			
Total	1905.90	39				

El análisis de la covarianza para evaluar los efectos de los distintos tratamientos sobre la variable corriente demostró que existe un efecto significativo de los distintos tratamientos (agua, NaOH 10%, NaOH 15%, NaOH, 20%) sobre la variable respuesta *corriente*, lo cual se evidencia con un p-valor de 0.0083 el cual es mayor que el nivel crítico de comparación ($p = 0.05$).

Tabla 4.3. Test: LSD Fisher corriente, covariable tensión Alfa=0.05 DMS=5.53652

Tratamiento	Mediasn	E.E.	
NaOH 20%	6.41 10	1.96	A
NaOH 15%	6.27 10	1.96	A
NaOH 10%	5.32 10	1.96	A
H2O	-3.47 10	2.20	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

La prueba LSD de Fisher para las covarianzas refleja que existe diferencia entre dos grupos, teniendo el hidróxido de sodio al 15% 20% y 10% la categoría A con medias de 6.41, 2.27 y 5.32 respectivamente, y el agua solo la categoría B con una media de -3.47, esto quiere decir que se obtienen mayores corrientes con soluciones de hidróxido de sodio, tomando en cuenta la tensión como covariable.

Tabla 4.4. Análisis de covarianza para la variable caudal, covariable tensión

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo	2.34	4	0.59	3.09	0.0280	
Tratamiento	1.85	3	0.62	3.26	0.0331	
Tensión	1.69	1	1.69	8.89	0.0052	0.05
Error	6.64	35	0.19			
Total	8.99	39				

El análisis de la varianza para evaluar los efectos de los distintos tratamientos sobre la variable caudal demostró que existe un efecto significativo de los distintos tratamientos sobre

la variable respuesta *caudal*, lo cual se evidencia con un p-valor de 0.028 el cual es mayor que el nivel crítico de comparación $p = 0.05$.

Tabla 4.5. Test:LSD Fisher Caudal Alfa=0.05 DMS=0.39551

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
NaOH 15%	0.40	10	0.14	A
NaOH 20%	0.38	10	0.14	A
NaOH 10%	0.26	10	0.14	A
H2O	-0.23	10	0.16	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

La prueba LSD de Fisher para la variable caudal, refleja que existe diferencia entre dos grupos, teniendo el hidróxido de sodio al 15% 20% y 10% la categoría A con medias de 0.40, 038 y 0.26 respectivamente, y el agua sola la categoría B con una media de -0.23 esto indica que se obtienen mayores caudales con soluciones de hidróxido de sodio, tomando en cuenta la tensión como covariable.

Tabla 4.6. Análisis de la varianza para la variable eficiencia

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.54	3	0.18	10.75	0.0003
Tratamiento	0.54	3	0.18	10.75	0.0003
Error	0.30	18	0.02		
Total	0.84	21			

El análisis de la varianza para evaluar los efectos de los distintos tratamientos sobre la variable eficiencia demostró que existe una respuesta estadística significativa de los distintos tratamientos sobre la variable respuesta *eficiencia*, lo cual se evidencia con un p-valor de 0.0003 el cual es menor que el nivel crítico de comparación $p = 0.05$.

Ya que el análisis de varianza mostró que, si existe una relación de causalidad entre los tratamientos y la eficiencia de la celda, y que hay diferencias significativas entre al menos uno de los tratamientos y los demás, se procedió a realizar la prueba de Fisher para la variable *eficiencia*.

Tabla 4.7. Test:LSD Fisher para eficiencia Alfa=0.05 DMS=0.17716

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
NaOH 15%	0.39	4	0.06	A
NaOH 20 %	0.27	4	0.06	A
NaOH 10%	0.23	4	0.06	A
H2O	0.00	10	0.04	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

La prueba LSD de Fisher para la variable eficiencia refleja que existe diferencia entre dos grupos, teniendo el hidróxido de sodio al 15% 20% y 10% la categoría A con medias de 0.39, 0.27 y 0.23, respectivamente, y el agua sola la categoría B con una media de 0, esto indica que entre utilizar puramente agua y utilizar disolución de hidróxido de sodio existen diferencias significativas en la eficiencia obtenida de la celda, obteniéndose medias de eficiencia mayores con disoluciones de NaOH.

Esto concuerda especialmente con los resultados esperados debido a que mediante la observación se constató que al utilizar solamente agua en la electrólisis no se producía gas o se producían muy pocas burbujas debido a la baja conductividad del agua pura.

Tabla 4.8. Análisis de la varianza para la variable temperatura

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	387.75	3	129.25	23.76	<0.0001
Tratamiento	387.75	3	129.25	23.76	<0.0001
Error	195.83	36	5.44		
Total	583.58	39			

El análisis de la varianza para evaluar los efectos de los distintos tratamientos sobre la variable respuesta temperatura demostró que existe una respuesta estadística significativa de los distintos tratamientos sobre la variable respuesta *temperatura*, lo cual se evidencia con un p-valor de 0.0001 el cual es menor que el nivel crítico de comparación $p = 0.05$.

Tabla 4.9. Test:LSD Fisher Temperatura; Alfa=0.05 DMS=2.11541

<u>Tratamiento</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
NaOH 20 %	30.19	10	0.74	A
NaOH 10%	28.66	10	0.74	A
NaOH 15%	25.89	10	0.74	B
<u>H2O</u>	<u>22.00</u>	<u>10</u>	<u>0.74</u>	<u>C</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

El test LSD de Fisher para la variable dependiente temperatura muestra que existen diferencias significativas entre los diferentes tratamientos y la temperatura, destacándose tres grupos. En la categoría A se encuentra el hidróxido de sodio al 20% y al 10% con medias de 30.19°C y 28.66°C respectivamente, en la categoría B se encuentra el tratamiento realizado con hidróxido de sodio al 15% con una media de 25.89°C, y finalmente en la categoría C se encuentra el agua sola con una media de 22 °C.

4.1.2.2 Correlaciones

El ANACORR, consiste en determinar el grado de asociación entre dos variables cuantitativas continuas, o calificar tal relación, lo cual se mide por el coeficiente de correlación “r” de Pearson y se realiza bajo la hipótesis nula de $H_0: \rho = 0$ (Casanoves, 2007).

Tabla 4.10. Correlación de Pearson tensión corriente

<u>Variable(1)</u>	<u>Variable(2)</u>	<u>n</u>	<u>Pearson</u>	<u>p-valor</u>
<u>Tensión</u>	<u>Corriente</u>	<u>40</u>	<u>0.25</u>	<u>0.1228</u>

El análisis de correlación de Pearson para las variables tensión y corriente dio como resultado un coeficiente de correlación de 0.25 y un p-valor de 0.1228, el cual es mayor que el valor de significancia $\alpha=0.05$, por lo que se acepta la hipótesis nula, la cual indica independencia de las variables. En este caso, el bajo coeficiente de correlación refleja la relación no lineal entre las variables tensión corriente ya que el coeficiente de correlación de Pearson se emplea en datos que se correlacionan linealmente.

Tabla 4.11. Correlación de Pearson Caudal Tensión

<u>Variable(1)</u>	<u>Variable(2)</u>	<u>n</u>	<u>Pearson</u>	<u>p-valor</u>
Caudal	Tensión	40	0.23	0.1463

El análisis de correlación de Pearson para las variables tensión y corriente dio como resultado un coeficiente de correlación de 0.23 y un p-valor de 0.1463, el cual es mayor que el valor de significancia $\alpha = 0.05$, por lo que se acepta la hipótesis nula, la cual indica independencia de las variables.

Tabla 4.12. Correlación de Pearson Corriente Caudal

<u>Variable(1)</u>	<u>Variable(2)</u>	<u>n</u>	<u>Pearson</u>	<u>p-valor</u>
Corriente	Caudal	40	0.97	<0.0001

El análisis de correlación de Pearson realizado para las variables corriente y caudal, dio como resultado un coeficiente de correlación “r” igual a 0.97, indicando que se tiene una correlación muy fuerte positiva entre las variables. El p-valor resulta menor que 0.0001, por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, la cual indica que existe dependencia entre las variables.

Esta relación concuerda con la primera de las leyes de las electrólisis establecidas por Faraday, la cual dice la masa de una sustancia liberada en la electrólisis (en este caso, cantidad de gas) es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado a través del electrólito (corriente) (Sancler, 2022).

Tabla 4.13. Correlación de Pearson Corriente Temperatura

<u>Variable(1)</u>	<u>Variable(2)</u>	<u>n</u>	<u>Pearson</u>	<u>p-valor</u>
Temperatura	Corriente	99	0.97	<0.0001

Entre las variables corriente y temperatura resultó un coeficiente de correlación de Pearson de 0.97 lo cual indica que hay una correlación positiva muy fuerte entre las variables, con un p-valor de 0.0001, el cual es menor al nivel crítico de comparación $\alpha = 0.05$, por lo cual se acepta la hipótesis alternativa, lo cual indica dependencia entre las variables temperatura y corriente.

Esto quiere decir que la temperatura es un factor importante en la obtención de hidrógeno, lo cual concuerda con el modelo planteado por Clemente Jul, et al. (2018), en el cual se determina que a medida que aumenta la temperatura, es necesario menor voltaje eléctrico, ya que aumenta la conductividad del electrolito, el voltaje reversible disminuye y se favorece la electrólisis.

Según Ísgró (2015), cuanto mayor es la temperatura, mayor es la conductividad del electrolito, menores los sobrepotenciales del cátodo y del ánodo, y mayor la eficiencia energética

Tabla 4.14. Correlación de Pearson Temperatura Caudal

<u>Variable(1)</u>	<u>Variable(2)</u>	<u>n</u>	<u>Pearson</u>	<u>p-valor</u>
Temperatura	Caudal	40	0.62	<0.0001

Para las variables temperatura y caudal se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.62 con un p-valor de 0.0001, menor al valor de significancia $p=0.05$, lo cual indica que existe una correlación alta positiva entre las variables.

Tabla 4.15. Correlación de Pearson Potencia Caudal

<u>Variable(1)</u>	<u>Variable(2)</u>	<u>n</u>	<u>Pearson</u>	<u>p-valor</u>
Potencia	Caudal	40	0.96	<0.0001

El análisis de correlación de Pearson para las variables potencia y caudal dio como resultado un coeficiente de correlación de 0.96, el cual indica que existe una relación positiva muy fuerte entre las variables, con un p-valor menor que 0.0001, Lo cual indica que la producción de gas está estrechamente relacionada con la potencia eléctrica consumida por electrolizador.

4.1.2.3 *Análisis de regresión*

4.1.2.3.1 *Tensión total - corriente*

Mediante el análisis de regresión no lineal empleando el modelo exponencial, el cual es el que mejor se ajusta a los datos, se pudieron realizar los ajustes de curva, obteniéndose las ecuaciones exponenciales para la variable tensión como predictora y la variable corriente como respuesta gracias a la estimación de los parámetros realizada por el software con el algoritmo Gauss-Newton. Esto permite que la polarización del electrolizador pueda ajustarse a un modelo matemático y puedan realizarse predicciones del comportamiento de la corriente en función de la tensión.

La Tabla 4.16 muestra las diferentes ecuaciones para la el ajuste exponencial de las curvas para los diferentes tratamientos realizados. En cada ecuación se pueden distinguir los parámetros estimados theta 1 y theta 2.

Tabla 4.16. Ecuaciones de regresión Tensión-Corriente

Tratamiento	Ecuación
H ₂ O	Corriente = 0.00197064 * exp(0.940574 * 'Tensión total')
NaOH 10%	Corriente = 0.0142676 * exp(0.176243 * 'Tensión total')
NaOH 15%	Corriente = 0.0230827 * exp(0.700947 * 'Tensión total')
NaOH 20%	Corriente = 0.000108416 * exp(1.3265 * 'Tensión total')

$$\text{Corriente} = \text{Theta1} * \exp(\text{Theta2} * \text{'Tensión total'})$$

Así mismo, se obtuvieron las gráficas de dispersión con curva ajustada mediante el modelo para cada tratamiento (Figura 4.10). Se puede apreciar que el ajuste es bastante bueno.

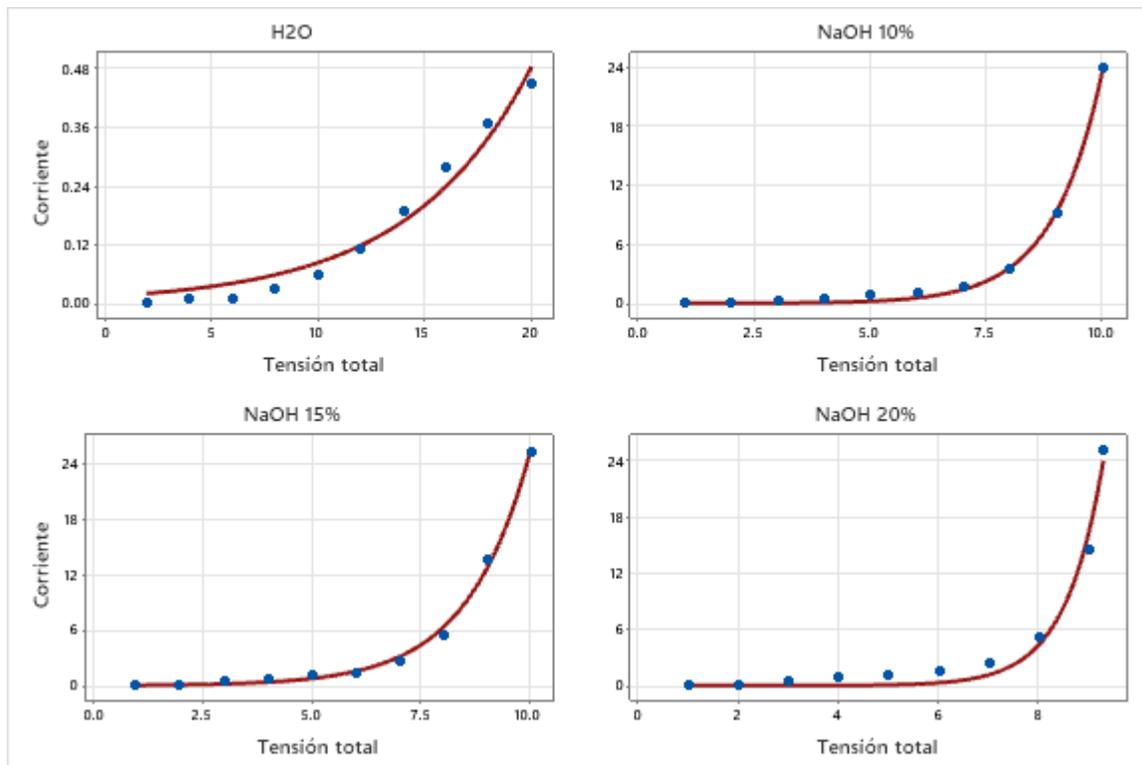


Figura 4.10. Ajuste exponencial tensión total vs corriente para cada tratamiento

4.1.2.3.2 Caudal - corriente

Mediante el análisis de regresión lineal se pudieron ajustar los datos a un modelo de regresión lineal para la variable *corriente* como predictora y la variable *caudal* como respuesta y se obtuvieron las siguientes ecuaciones para cada tratamiento (se ha omitido el tratamiento realizado con agua pura debido a que no se registraron datos significativos de caudal):

Tabla 4.17. Ecuaciones de regresión Caudal-Corriente

Tratamiento	Ecuación	S	R ²	R ² (ajustado)
NaOH 10%	Caudal = -0.0435 + 0.05527 Corriente	0.035	99.37%	99.29%
NaOH 15%	Caudal = -0.0226 + 0.06814 Corriente	0.166	92.81%	91.91%
NaOH 20 %	Caudal = -0.0923 + 0.07613 Corriente	0.125	96.61%	96.19%

La Tabla 4.17 muestra las diferentes ecuaciones para los tres tratamientos realizados con NaOH con su error estándar (S), el coeficiente de determinación (R²) y el coeficiente de determinación ajustado (R²).

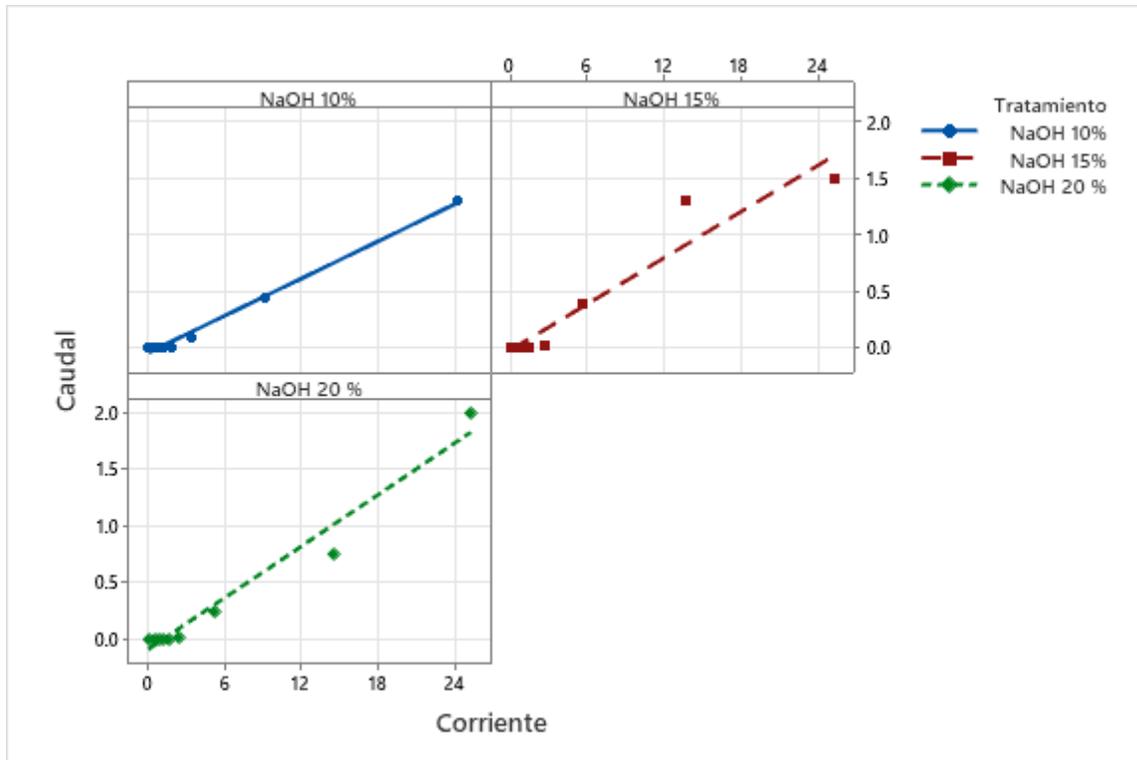


Figura 4.11. Ajustes de regresión lineal caudal vs. corriente

En la Figura 4.11 se aprecian gráficamente los ajustes realizados después de la estimación de los parámetros del modelo de regresión lineal, se puede apreciar que existe un buen ajuste de curvas evidenciado con un coeficiente de determinación R^2 mayor que 90% en todos los casos.

4.1.2.3.1 Corriente – Temperatura

La Figura 4.12 muestra el gráfico con ajuste de regresión lineal para las variables Corriente y Temperatura, se aprecia que existe un buen ajuste lineal con un R^2 de 93.8%. La ecuación de la línea de regresión se ve reflejada en el mismo. Se aprecia que existe una relación lineal positiva entre ambas variables, lo que implica que a medida que la corriente aumenta, la temperatura también.

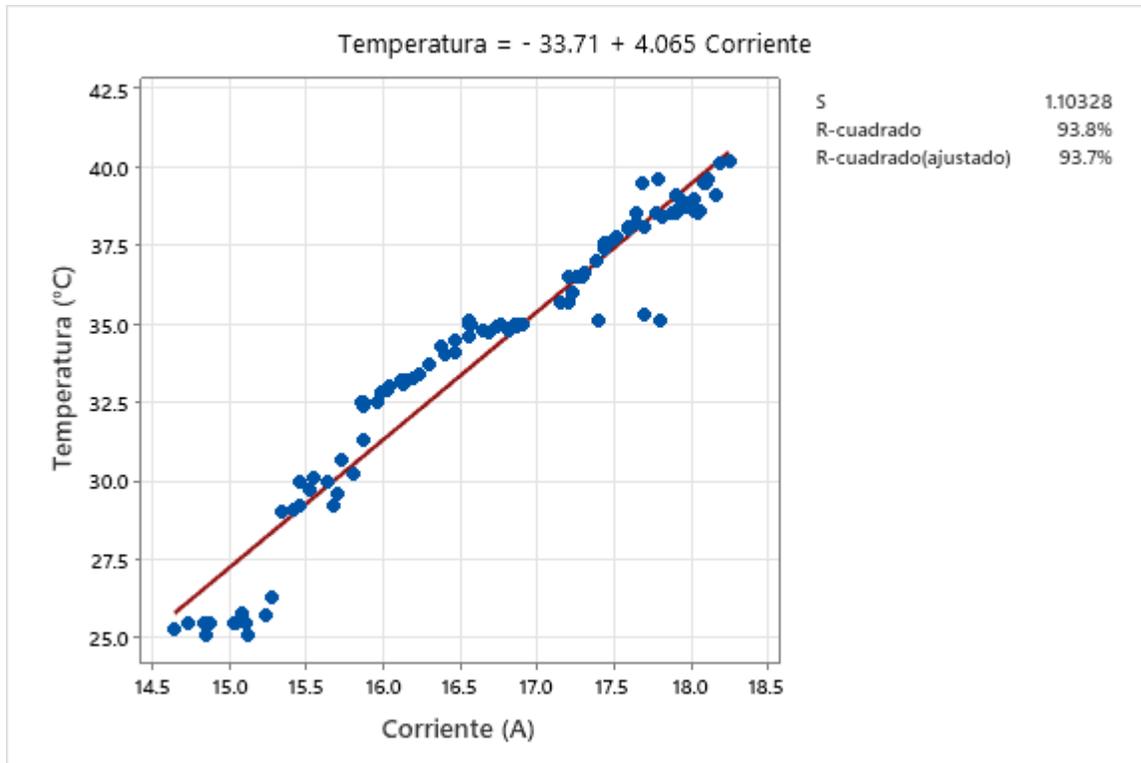


Figura 4.12. Gráfica de dispersión con línea de ajuste Corriente vs. Temperatura

4.1.3 Cálculo de la eficiencia energética de la celda

Para calcular la eficiencia termodinámica máxima de una celda de electrólisis que opera de manera reversible produce números sin sentido que superan el 100 %. El problema es que se necesita electricidad y calor para dividir el agua electroquímicamente y el calor no se incluye en el cálculo anterior de la entrada de energía. El potencial electroquímico (potencial estándar) correspondiente al PCS (poder calorífico superior) es de 1.481 V/celda esto representa el voltaje termoneutral al que se encuentran el hidrógeno y el oxígeno producido con una eficiencia térmica del 100 % (es decir, sin calor residual producido por la reacción), (Harrison, Remick, Martin, & Hoskin, 2010).

En la Figura 4.13 se observa la relación entre los voltajes termoneutro y reversibles en función de la temperatura, así como las zonas de funcionamiento de la electrólisis

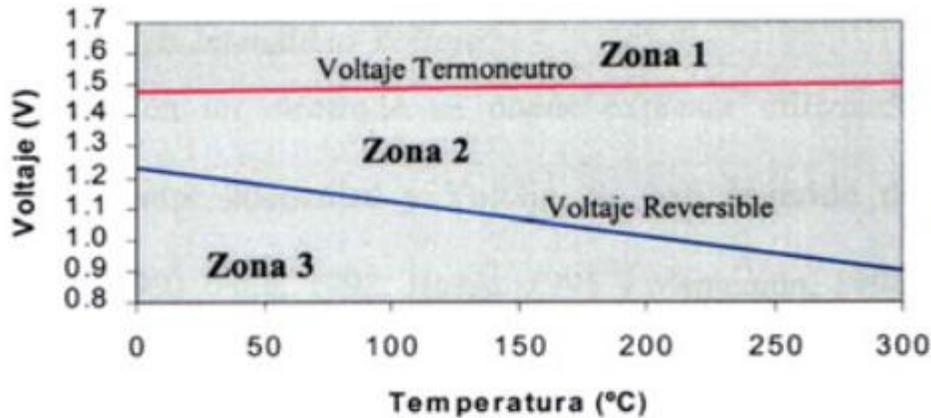


Figura 4.13 Dependencia del voltaje reversible y termoneutro con la temperatura

De acuerdo a López Ramírez (2018) se diferencian tres zonas.

Zona 1 $U > U_{tn}$ Se produce la electrólisis y la potencia debida al exceso de voltaje se degrada en forma de calor calentando el electrolito, este es precisamente el calor generado

$$\dot{Q}_{zona\ 1} = \dot{Q}_{gen} = (U - U_{tn}) \cdot I \quad (4.1)$$

Zona 2 $U_{tn} > U > U_{rev}$ La electrólisis solo es posible si se aporta energía adicional en forma de calor, el calor necesario vendrá definido por:

$$\dot{Q}_{zona\ 2} = (U_{tn} - U) \cdot I \quad (4.2)$$

Zona 3 $U < U_{tn}$ La electrólisis es imposible, no circula ninguna intensidad por los electrodos de la celda

$$(I = 0)$$

El voltaje termoneutro es determinado usando la Ley de Faraday, y dividiendo el PCS (285,840 J/mol) por el Faraday constante ($F = 96,485$ culombios mol⁻¹) y el número de electrones necesarios para crear una molécula de hidrógeno ($z = 2$) (Sánchez, 2019)

$$E_o = \frac{\Delta_f H^o}{zF} = \frac{285,840 \text{ J/mol}}{2 * 96485 \text{ C/mol}} = 1.481 \text{ V}$$

(4.3)

Este voltaje, 1,481 voltios, se requiere para dividir el agua líquida. Es el voltaje al cual una celda de electrólisis operando a 25°C puede operar sin producir exceso de calor. (Las celdas prácticas funcionan por encima de este voltaje y producen un exceso de calor). También es el voltaje que corresponde al PCS del hidrógeno y, por lo tanto, representa un valor más razonable para usar al calcular la eficiencia del voltaje de la pila y la celda. (Da Rosa, 2005)

La fórmula para calcular la eficiencia de voltaje de una celda o pila de celdas se convierte así en la siguiente.

$$\text{Eficiencia de voltaje} = \frac{\text{Voltaje termoneutral (E)}}{\text{Voltaje de operación de la celda (V)}} \quad (4.4)$$

Para el caso de la celda estudiada en esta investigación se determinó la eficiencia de voltaje para cada valor de voltaje de la fuente manipulado, tomándose solamente los datos a partir de los cuales se observó producción de gas.

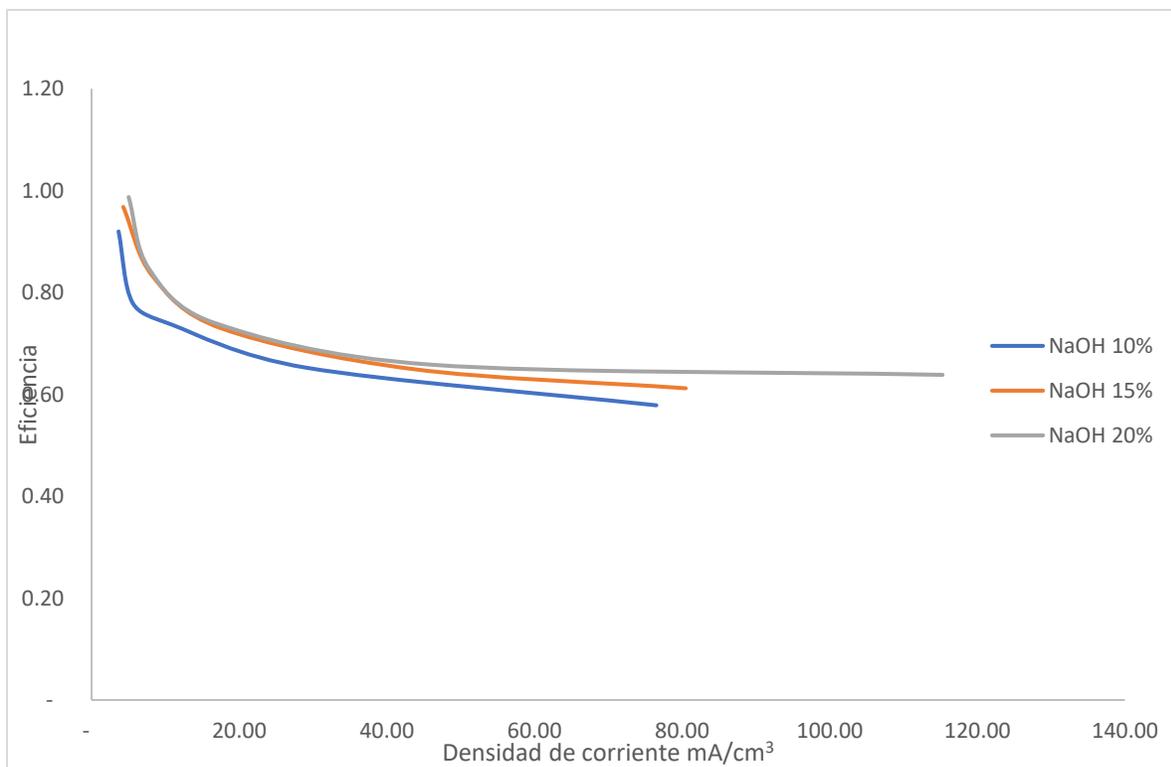


Figura 4.14 Eficiencia de voltaje en función de la densidad de la corriente

En la figura 4.14 se aprecian las diferentes eficiencias de voltaje en función de la densidad de corriente para cada tratamiento con NaOH. Se puede observar que con NaOH al 20% se

obtiene una curva que alcanza mayores valores de eficiencia que con los otros dos tratamientos, además esta curva parece tomar valores constantes de eficiencia a partir de 100 mA/cm².

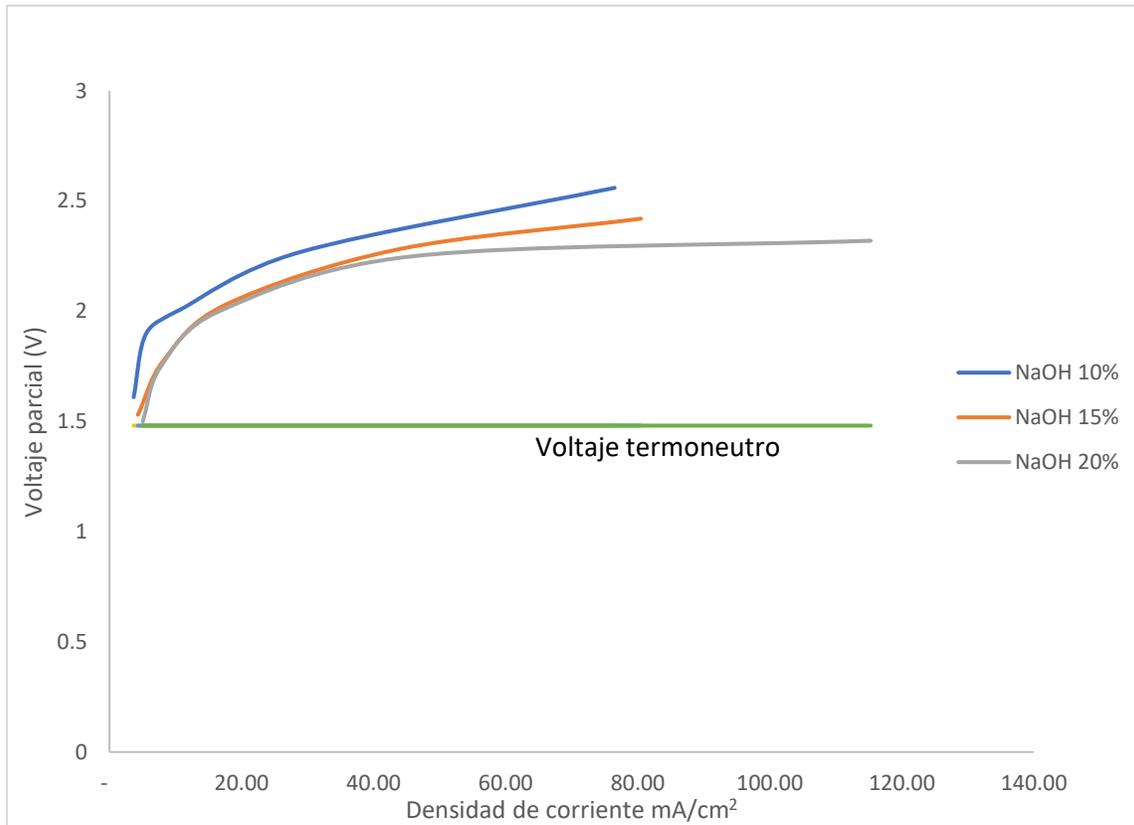


Figura 4.15 Voltaje parcial aplicado en función de la densidad de corriente

En la figura 4.15 se muestran las curvas de voltaje parcial de placas en función de la densidad de corriente para cada tratamiento realizado con NaOH, se puede apreciar que los voltajes parciales superan el voltaje termoneutro. Las regiones comprendidas entre el voltaje termoneutro y los voltajes parciales de cada curva se pueden considerar como pérdidas las cuales se ven reflejadas en forma de calor (Ecuación 4.1).

4.1.4 Comparación teórica de las tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis

Tabla 4.18. Tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis

Tecnología	AEC ²	PEM ³	SOEC ⁴
Electrolito	Solución de KOH	Membrana polimérica	Óxido sólido
Portador de carga	OH ⁻	H ⁺	O ₂ ⁻
Densidad de la corriente (A/cm ²)	0.5	2.0	2.0
Voltaje(V)	1.75-2.4 V	1.6-2.0 V	1.2- 1.3 V
Temperatura de operación (°C)	60-80	50-80	650-1000
Presión de trabajo	1-30	30-80	1
Eficiencia eléctrica (kWh/Nm ₃ de h ₂ producido)	4.3-5.5	4.5-5.4	3.2-3.7
Eficiencia eléctrica (% , PCI ⁵)	63-70	56-60	40

² Celda de electrolisis alcalina

³ Electrolito de membrana polimérica

⁴ Celda de electrolisis de óxido sólido

⁵ Poder calorífico inferior

En la Tabla 4.18 se resumen las principales características de los electrolizadores AEC, PEM y SOEC descritos anteriormente, donde se observa el potencial de cada una de las tecnologías.

La tecnología AEC, aun siendo la que posee una mayor madurez está viendo el crecimiento de la tecnología PEM, que con unos rendimientos parecidos pero una mayor flexibilidad para adaptar su operación a fuentes renovables, y un menor volumen por la misma capacidad, está siendo una de las tecnologías más probadas en proyectos de demostración, tanto en aplicaciones industriales como de movilidad.

Por otra parte, la tecnología SOEC ofrece mejores rendimientos debido a su operación a elevadas temperaturas que le confiere claras ventajas termodinámicas, pero todavía se encuentra en un estado de madurez tecnológica inferior y requiere de una inversión inicial mayor, especialmente para aplicaciones que requieran presurización del hidrógeno obtenido.

Tabla 4.19. Comparación de electrolizador teórico vs experimental de este estudio

Tecnología AEC	Experimental	Teórico
Electrolito	NaOH	KOH
Portador de carga	OH	OH
Densidad de corriente (A/cm ²)	0.1	0.5
Voltaje (V)	1.53-2.56	1.75-2.4V
Temperatura de operación (°C)	40	60-80
Presión de trabajo	1	1-30
Eficiencia eléctrica (PCS)	63% máx.	63-70

En la Tabla 4.19 se encuentra una comparación entre los datos teóricos y los datos experimentales obtenidos en la presente investigación. Se puede apreciar que existe una similitud entre estos.

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

Se realizó una investigación de las diferentes tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis, la cual permitió la identificación de los principales parámetros de cada tipo de tecnología mediante los cuales se pudo realizar una comparación técnica de estas. Siendo estos parámetros: el electrolito, portador de carga, densidad de corriente, voltaje, presión de trabajo, temperatura de operación y eficiencia. Mediante la consideración de estos parámetros de comparación se destacaron tres principales tecnologías; celda de electrólisis alcalina (AEC), la cual alcanza eficiencias de 63-70%, electrolizador de membrana polimérica (PEM), con eficiencias de 56-60% y celda de electrólisis de óxido sólido (SOEC) con eficiencia de 40%, lo que permitió seleccionar la tecnología AEC, como base para el prototipo a diseñar.

Se efectuó con éxito el diseño, la selección de materiales y la construcción del prototipo, el cual constituyó la unidad experimental para la realización de pruebas, cumpliendo satisfactoriamente con los requisitos de seguridad y fiabilidad esperados, siendo completamente funcional y apto para la experimentación. Además, se logró realizar una descripción detallada de los componentes de este, en cuanto a sus dimensiones físicas y su funcionamiento.

Mediante el análisis de correlación de Pearson se determinaron los coeficientes de correlación entre las variables, el cual permitió determinar que existe una relación muy fuerte entre la corriente consumida por el generador, la potencia, la temperatura y el caudal de gas producido, y que hay independencia de la tensión con el caudal, por lo cual se pudieron contrastar los resultados con la teoría, ya que la producción de hidrógeno depende directamente de la densidad de corriente y la temperatura.

Los análisis de varianza y covarianza permitieron comparar las medias de las variables respuesta con los diferentes tratamientos, y mediante la prueba LSD de Fisher se determinó que existen diferencias significativas entre los tratamientos, la corriente, el caudal, la temperatura y la eficiencia obtenida, obteniéndose mejores resultados (mayores medias) con los tratamientos realizados con hidróxido de sodio que los realizados solamente con agua.

Mediante el análisis de regresión se pudo realizar un buen ajuste de curvas gracias a la regresión no lineal entre las variables tensión-corriente con un coeficiente de determinación alto. Se realizó un ajuste satisfactorio de regresión lineal para corriente-caudal para cada tratamiento, y para temperatura-corriente.

Mediante los datos registrados obtenidos en la experimentación se realizó un cálculo matemático en función del voltaje termoneutro y el voltaje entre placas, este determinó la eficiencia eléctrica de la celda, el cual dio como resultado una eficiencia de 63%.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda incentivar estudios acerca del hidrógeno y sus posibles aplicaciones en Nicaragua.

Para futuros estudios se recomienda la utilización de otros electrolitos como el hidróxido de potasio (KOH), el cual según diversas investigaciones tiene un buen desempeño para acelerar la electrólisis y aumentar la eficiencia de esta.

Para el manejo de electrolitos como hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) se recomienda un manejo cuidadoso haciendo uso de equipo de protección, como son guantes, bata, lentes de protección, mascarilla y cristalería de química adecuada para el manejo de las disoluciones.

Siempre antes de iniciar cualquier prueba se recomienda purgar el dispositivo, para que los residuos no afecten los resultados.

Se debe verificar que el dispositivo este cerrado herméticamente, que las mangueras estén conectadas de manera adecuada, sin fugas de gas y de fluido electrolítico.

Evitar que el burbujeador se encuentre en un nivel muy bajo de agua por que dejaría de trabajar como elemento de seguridad.

Se debe hacer un uso precavido al usar fuentes de ignición, ya que este es gas es altamente explosivo.

Se recomienda, para futuras pruebas utilizar un método que permita separar ambos gases y darles salidas independientes para así obtener hidrógeno puro, el cual tiene más aplicaciones de interés para las energías renovables.

5.3 Bibliografía

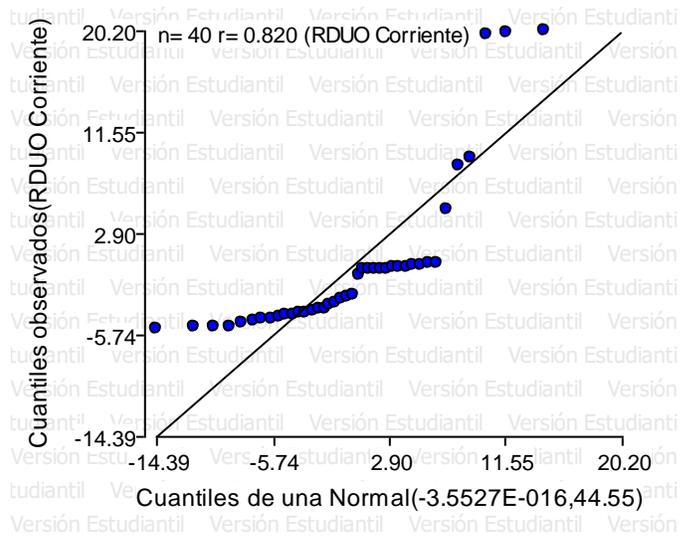
- Álcantara , V., & Padiila, E. (2005). *Analisis de las emisiones de Co2 y sus factores explicativos en las diferentes partes del mundo* . barcelona : bellllatera.
- Alcantará, K. (2019). *Un poco de todo sobre el hidrogeno* (Vol. 1). Mexico. Obtenido de https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/70_1/PDF/Hidrogeno.pdf
- Aleasoft. (noviembre de 2020). *Aleasoft*. Obtenido de Aleasoft.com: <https://aleasoft.com/es/todos-colores-hidrogeno/>
- Alvares Contreras, M. I., & Mendieta Gaitán, E. d. (2016). Aplicación del proceso de descarbonización del motor M16A de un vehículo Suzuki SX4 utilizando un generador de HHO. (*Tesis de grado*). UNI, Managua. Obtenido de <https://ribuni.uni.edu.ni/1737/1/90294.pdf>
- Ares, J., Leardini, F., Sánchez, C., Fernandez, J., & Ferrer, I. (agosto de 2019). El hidrógeno como vector energético: mucho hecho pero casi todo por hacer. *Encuentros multidisciplinares*, 10.
- Berry, G., & Aceves , S. (2006). *La economía del hidrógeno como solución al problema de la estabilización del clima mundial*. Guanajuato.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* . Mexico: McGRAW-HILL.
- Clemente Jul, M. d., Sánchez Delgado, M., & Rodríguez, L. (2018). Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. *Anales de la Real Academia de Doctores de España*, 3, 19-36. Obtenido de <https://www.radoctores.es/doc/2V3N1-CLEMENTE%20-%20produccion%20de%20hidrogeno.pdf>
- Da Rosa, A. (2005). *Fundamentals of Renewable energy processes* . standord : Elsevier.
- Díaz Rey, A. O., González Gil, J. E., & González Estrada, O. A. (2018). Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión

- interna. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 143-154. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5537/553756967014/html/>
- EPEC. (s.f.). Faraday y la electrolisis . *EPEC*, 2. Obtenido de <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/fichafaraday.pdf>
- Fierro, J. L. (octubre de 2011). Hidrógeno metodologías de producción. *Lychnos*, 01(6), 6. Obtenido de https://fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion
- García , A. (9 de 2019). *UDG*. Obtenido de Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial: http://www2.udg.edu/Portals/88/proc_industrials/5%20-%20Otros%20Combustibles-Hidrogeno.pdf
- Harrison, K. W., Remick, R., Martin, G. D., & Hoskin, A. (2010). *Hydrogen Production: Fundamentals case study and summaries*. Springfield: U.S departamen of energy.
- Ísgro, M. d. (2015). *El hidrogeno como vector energetico: su obtencion por electrolisis*. L HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGETICO: SU OBTENCIÓN POR ELECTRÓLISIS: ENALTECS.
- Linares Hurtado, J. I., & Moratilla Soria , B. Y. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Madrid : Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- López Ramírez, J. R. (2018). *Modelo dinamico de un electrolizador alcalino*.
- Miranda Barreras, Á. L., & Aguer Hortal, M. (2007). *El hidrógeno: Fundamento de un futuro equilibrado* (Vol. 2). España: Editorial Díaz de Santos, S.A. Obtenido de <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479788094.pdf>
- Molina, R., Roca, J., Pérez, E., Gato, F., Pardo, H., & Calvo, J. (2021). *Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica*. Universidad de caruña. Obtenido de https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/27268/Aguado_Molina_2021_Hidrogeno_y_su_almacenamiento.pdf?sequence=3

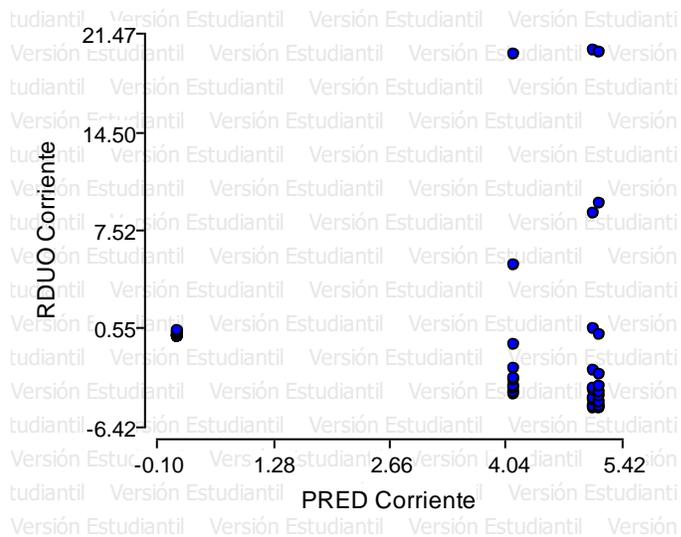
- Quezada Romero, E. M., & Torres Gualan, D. F. (2014). Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo Chevrolet Steem 1.6L. (*Tesis de grado*). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7354/1/UPS-CT004305.pdf>
- Ramos, M. F. (2009). *Hidrogeno aplicacion en motores de combustion interna* . Barcelona.
- Rifkin, J. (2002). *La economia del hidrogeno*. Ediciones Paidós Ibérica, S.A.
- Sánchez Delgado, M. (2019). *Desarrollo y validacion de un modelo para la simulación de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables* . Madrid.
- Sánchez, F., & Vargas, A. (2005). *La volatilidad de los precios del petróleo y su impacto en América latina*. (C. D. Naciones Unidas, Ed.)
- Sancler, V. (2022). Ley de faraday . *Euston96*.
- Sarabia, I. P., & Artola, A. A. (2017). *ribuni.uni.edu.nif*. Obtenido de <https://ribuni.uni.edu.ni>: <https://ribuni.uni.edu.ni/1657/1/91310.pdf>
- Solano, J. R. (2004). *Hacia una economía* . caracas.
- Tomante , J. R., Andreu, T., Garcia , G., Aguilera, J., Tarancón, A., & Torrel, M. (2020). *Hidrógeno vector de una economía descarbonizada*. Madrid: Fundacion Naturgy.

Anexos

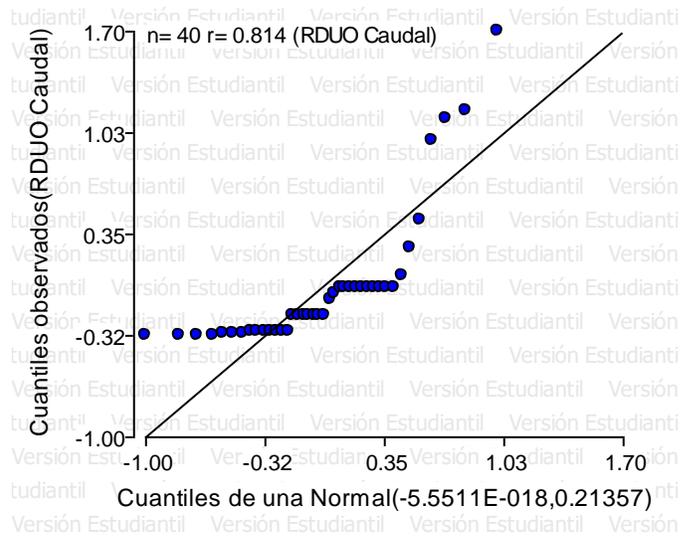
Anexo A



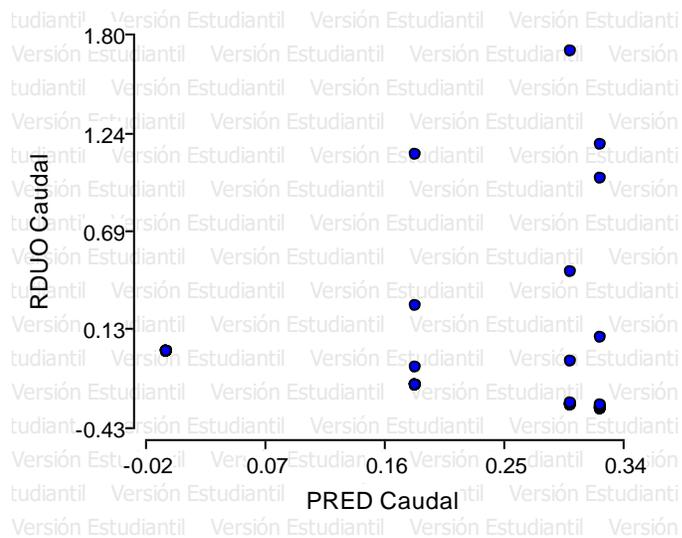
Anexo A- 1. Normalidad de los residuos corriente



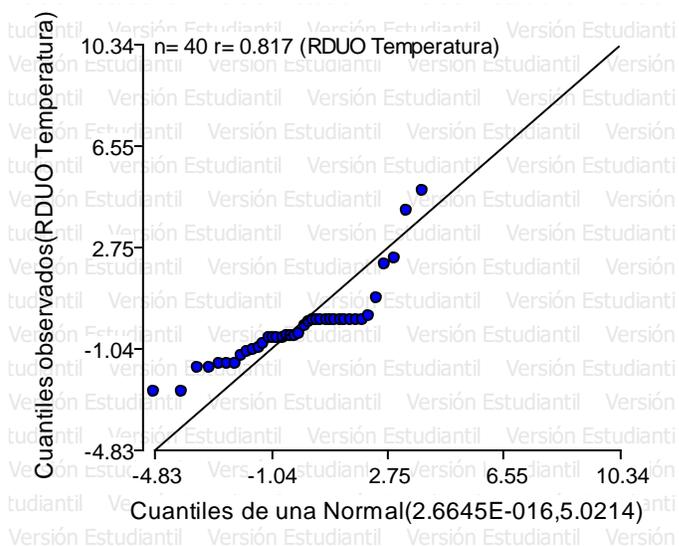
Anexo A- 2. Independencia de los residuos corriente



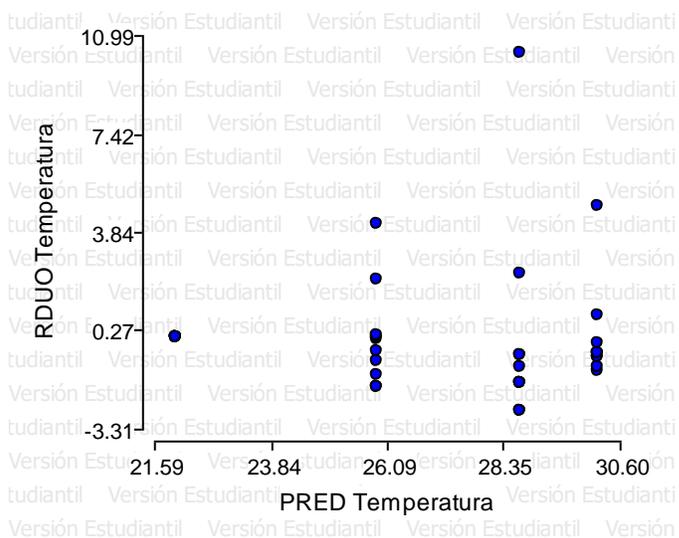
Anexo A- 3. Normalidad de los residuos caudal



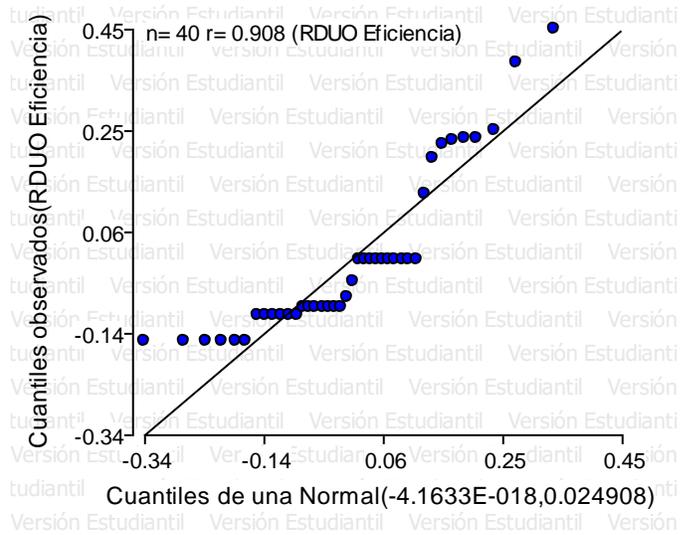
Anexo A- 4. Independencia de los residuos caudal



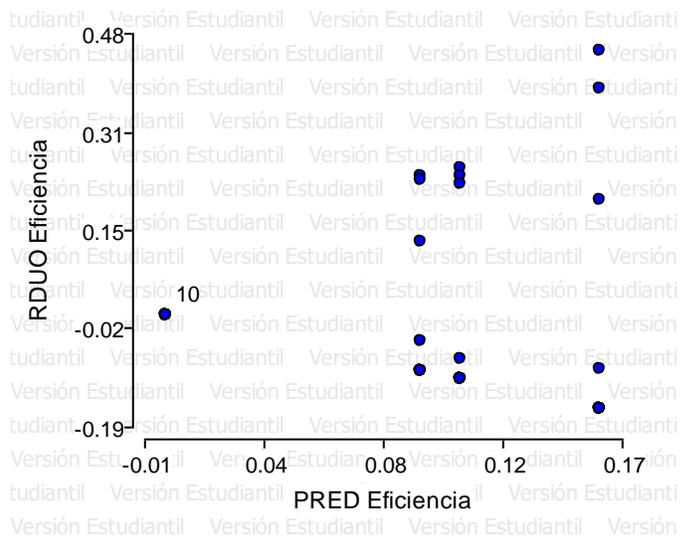
Anexo A- 5. Normalidad de los residuos temperatura



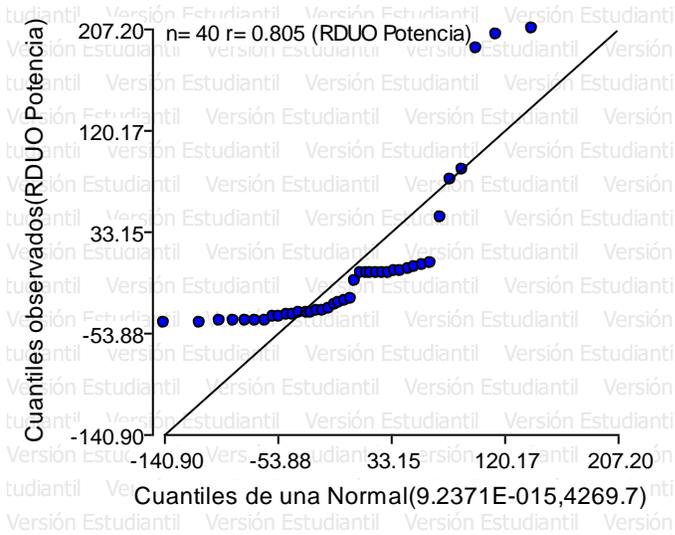
Anexo A- 6. Independencia de los residuos temperatura



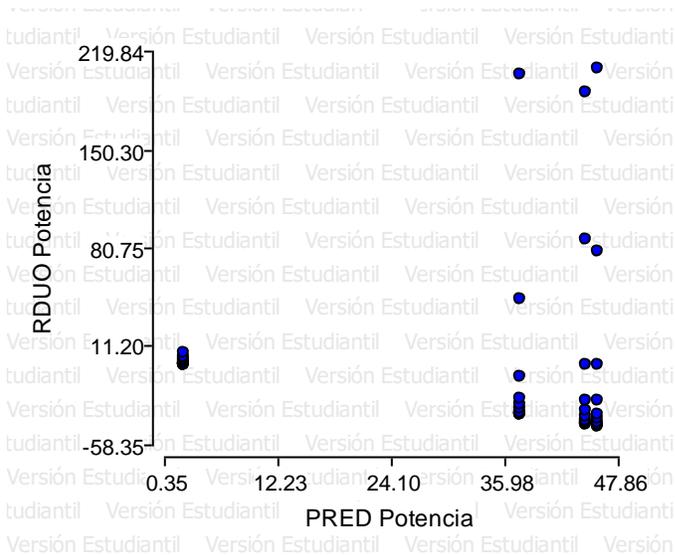
Anexo A- 7. Normalidad de los residuos eficiencia



Anexo A- 8. Independencia de los residuos eficiencia



Anexo A- 9. Normalidad de los residuos potencia



Anexo A- 10. Independencia de los residuos potencia

Anexo A- 11. Homogeneidad de la varianza residuos corriente

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
RDUO Corriente	40	0.00	0.00	sd

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamiento	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Error	1737.44	36	48.26		
Total	1737.44	39			

Anexo A- 12. Homogeneidad de la varianza residuos caudal

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
RDUO Caudal	40	0.00	0.00	8.66494636692799E18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamiento	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Error	8.33	36	0.23		
Total	8.33	39			

Anexo A- 13. Homogeneidad de la varianza residuos temperatura

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
RDUO Temperatura	40	0.00	0.00	954902553515947000.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamiento	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Error	195.83	36	5.44		
Total	195.83	39			

Anexo A- 14. Homogeneidad de la varianza residuos eficiencia

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
RDUO Eficiencia	40	0.00	0.00	5.91835399198387E18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamiento	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Error	0.97	36	0.03		
Total	0.97	39			

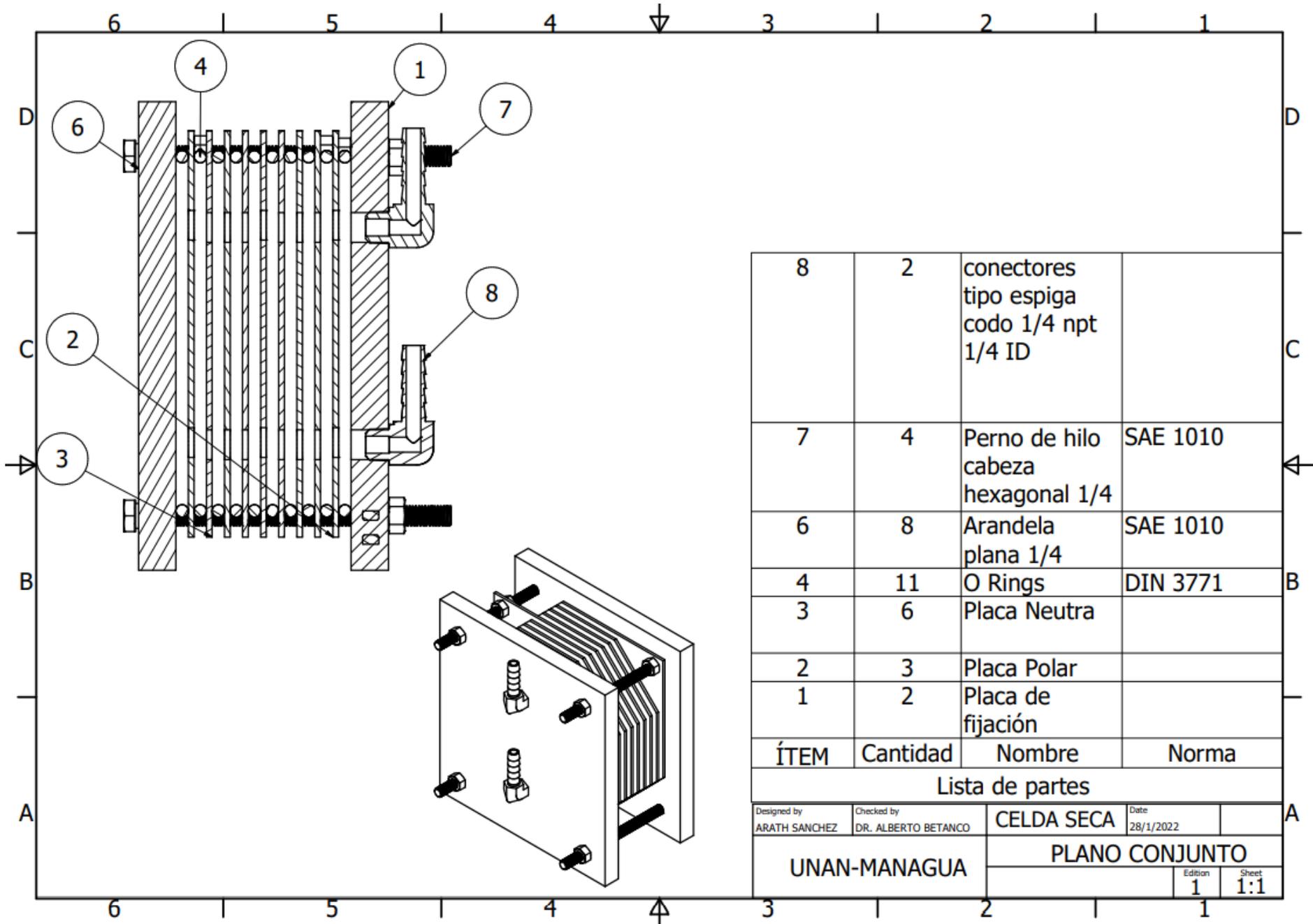
Anexo A- 15. Homogeneidad de la varianza residuos potencia

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
RDUO Potencia	40	0.00	0.00	4.78586717422962E18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamiento	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Error	166519.15	36	4625.53		
Total	166519.15	39			

Anexo B-1. Plano de conjunto: Electrolizador

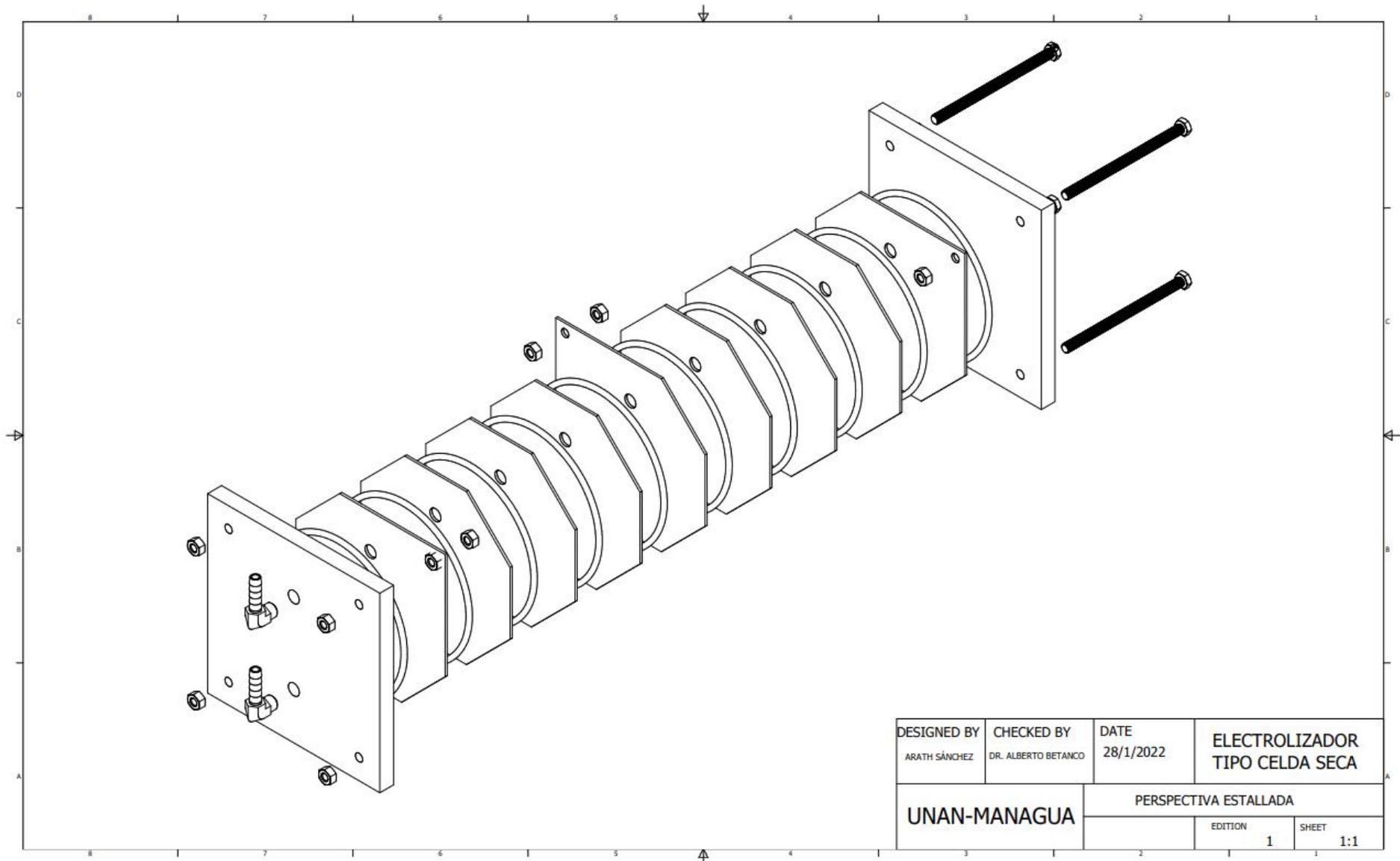


8	2	conectores tipo espiga codo 1/4 npt 1/4 ID	
7	4	Perno de hilo cabeza hexagonal 1/4	SAE 1010
6	8	Arandela plana 1/4	SAE 1010
4	11	O Rings	DIN 3771
3	6	Placa Neutra	
2	3	Placa Polar	
1	2	Placa de fijación	
ÍTEM	Cantidad	Nombre	Norma

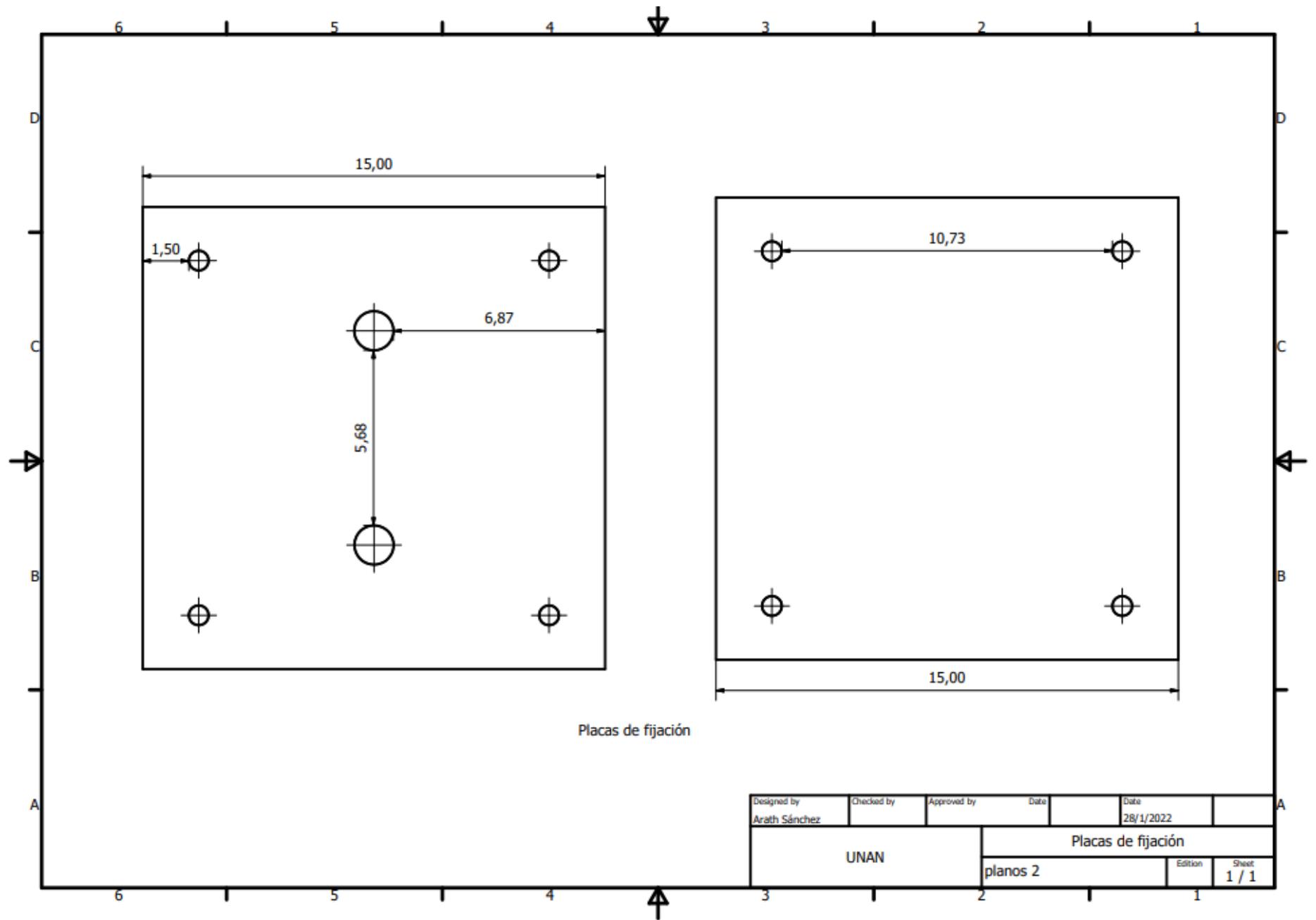
Lista de partes

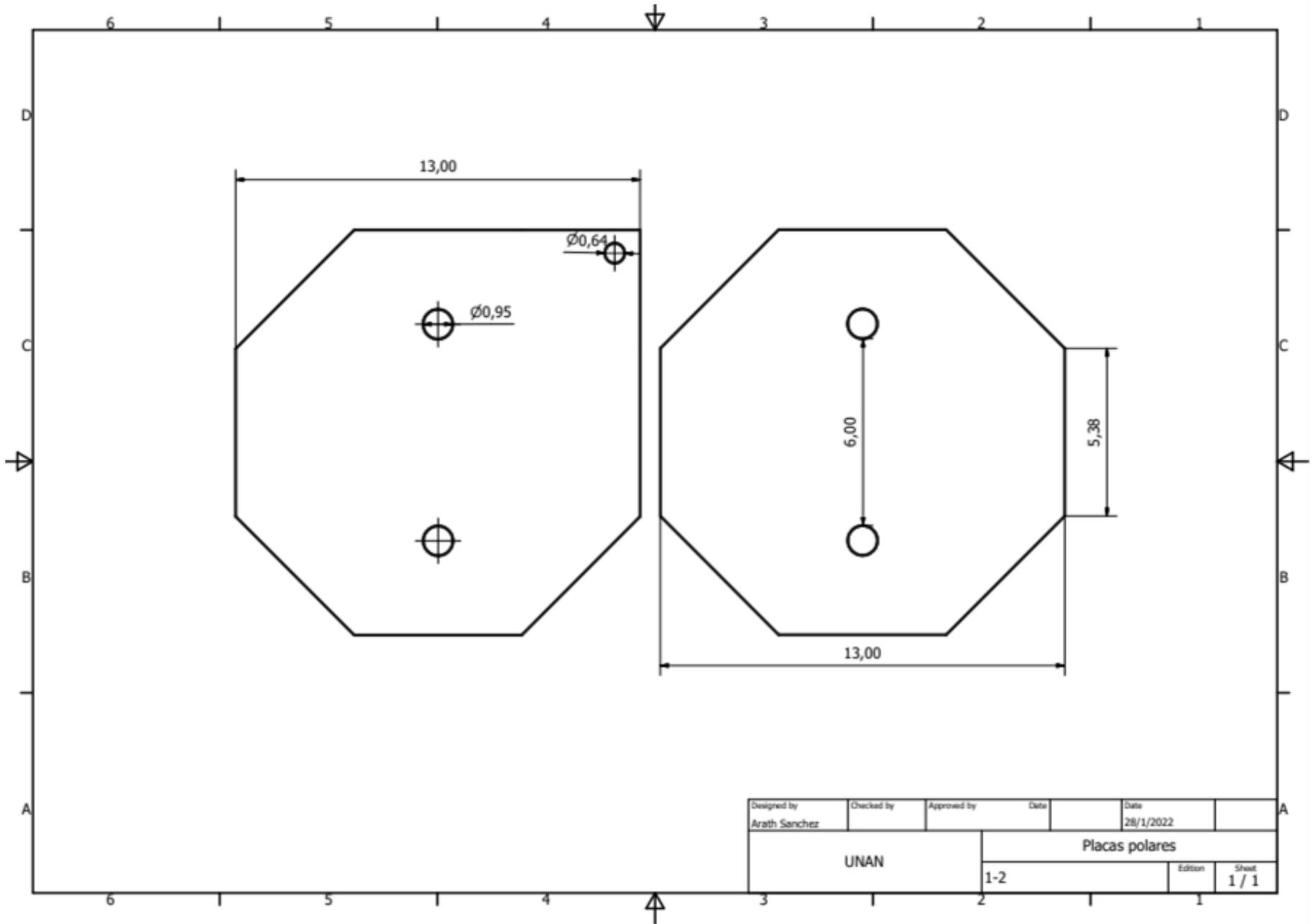
Designed by ARATH SANCHEZ	Checked by DR. ALBERTO BETANCO	CELDA SECA	Date 28/1/2022
UNAN-MANAGUA		PLANO CONJUNTO	
		Edition 1	Sheet 1:1

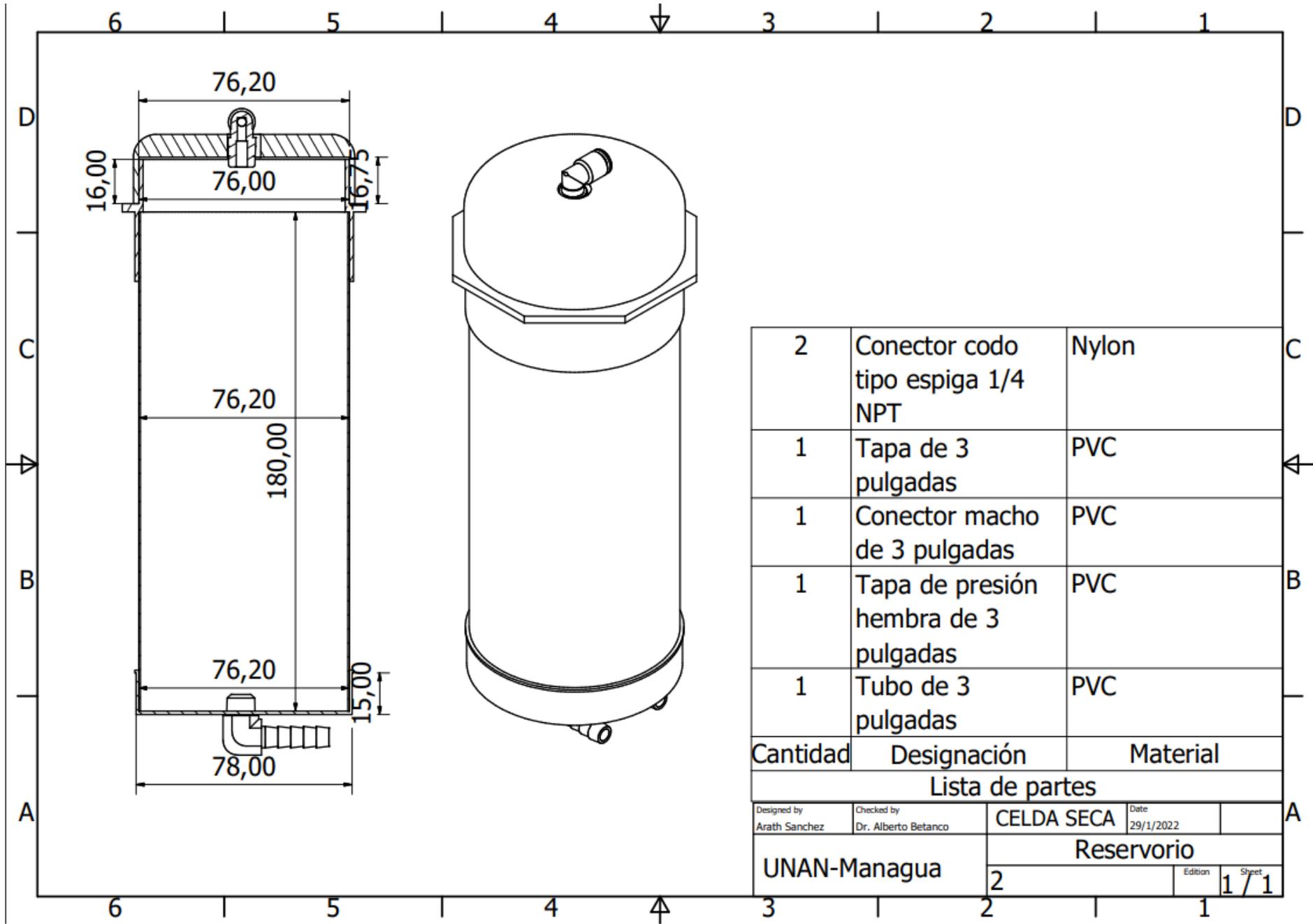
Anexo B-2. Plano de montaje: Electrolizador



Anexo B-3. Plano de placas de sujeción





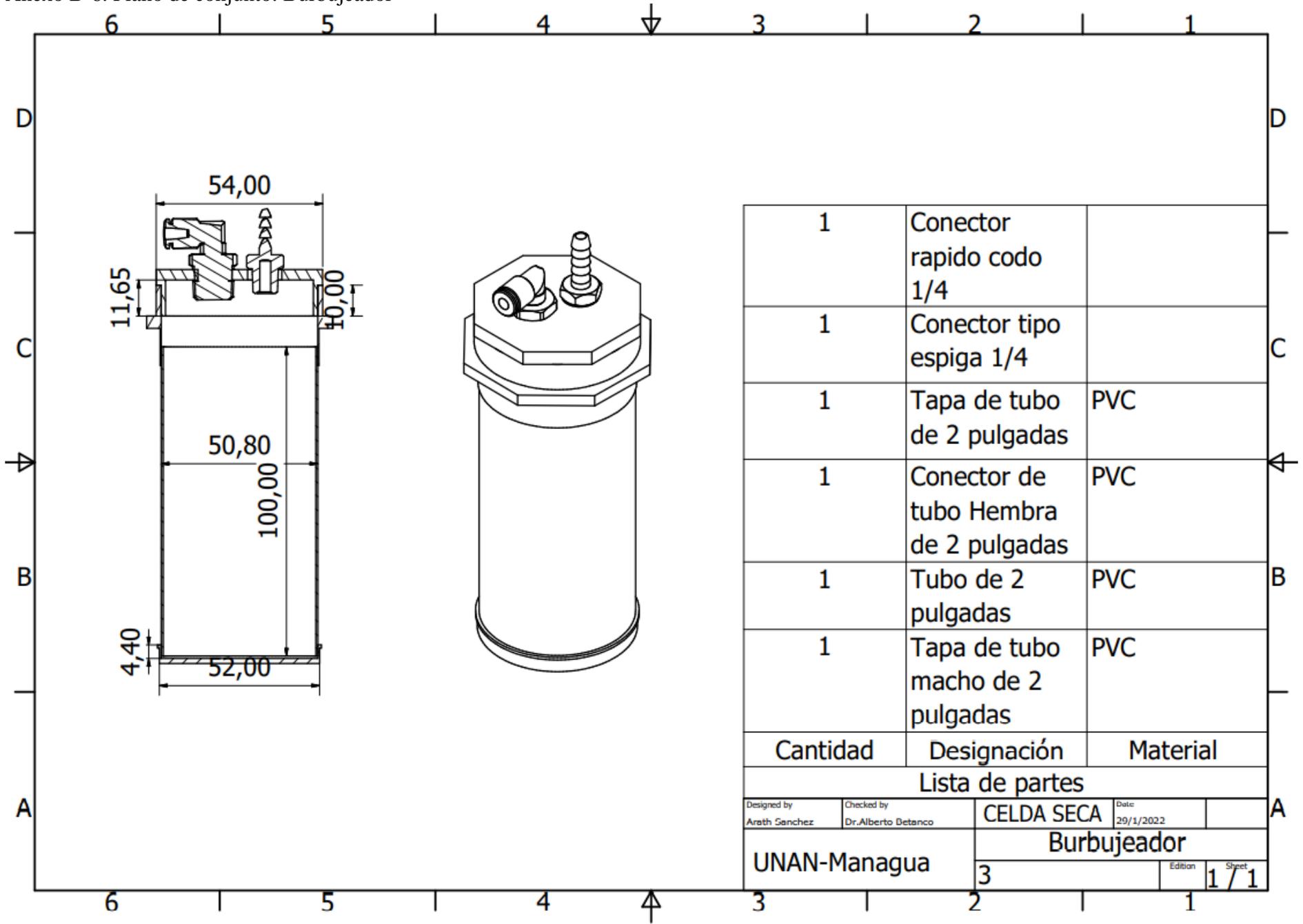


2	Conector codo tipo espiga 1/4 NPT	Nylon
1	Tapa de 3 pulgadas	PVC
1	Conector macho de 3 pulgadas	PVC
1	Tapa de presión hembra de 3 pulgadas	PVC
1	Tubo de 3 pulgadas	PVC
Cantidad	Designación	Material

Lista de partes

Designed by Arath Sanchez	Checked by Dr. Alberto Betanco	CELDA SECA	Date 29/1/2022
UNAN-Managua		Reservorio	
2		Edition	Sheet 1 / 1

Anexo B-6. Plano de conjunto: Burbujeador



1	Conector rapido codo 1/4	
1	Conector tipo espiga 1/4	
1	Tapa de tubo de 2 pulgadas	PVC
1	Conector de tubo Hembra de 2 pulgadas	PVC
1	Tubo de 2 pulgadas	PVC
1	Tapa de tubo macho de 2 pulgadas	PVC
Cantidad	Designación	Material

Lista de partes

Designed by Araeth Sanchez	Checked by Dr. Alberto Betanco	CELDA SECA	Date 29/1/2022	
UNAN-Managua		Burbujeador		
		3	Edicion	Sheet 1 / 1

