



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA QUÍMICA



**CINÉTICA DE FORMACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE EL
PROCESO DE ELECTRÓLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA
SECA**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. ARTURO QUISBERT MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

A mi dios jehová por dotarme una mente brillante y que un día le enorgulleceré.

A mi madre y padre impulsaron en todo mi proceso de formación personal y profesional, quienes me guiaron por el camino correcto, e hizo de mi persona de bien.

A mi hermana Ely y hermanos. Quienes me inspiraron a ser un profesional capaz de materializar cualquier fuente de energía, y colaborar con la sociedad con los avances y aplicaciones tecnológicas para hacer una república. Potencia económica.

Arturo



AGRADECIMIENTO

A mis docentes de la Universidad nacional del altiplano de puno. Facultad de ingeniería química quienes fueron los responsables de mi formación profesional. A quienes admiro y agradezco de su capacidad y experiencia en la rama de la ingeniería. A mis jurados, director y asesor de tesis, por guiarme y apoyarme en la culminación del presente trabajo de investigación experimental.

A mis familiares por su colaboración en esta investigación, a mis compañeros y amigos por compartir momentos de la vida universitaria.

A mis docentes de la FIQ. Por su Cooperación les tengo un eterno agradecimiento:

A mi director y asesor: Msc Higinio Alberto Zúñiga Sánchez

A mi presidente: Dr. Gregorio palomino cuela

Primer miembro: Msc. Ciro Hernán vera alarista

Segundo miembro: Msc. Roger Huanqui Pérez

Msc: Salomón Titto León

Dr. Norberto Sixto Miranda Zea

Dra. Mirian Eugenia Pacheco Tanaka

Ph Dr. Walther Aparicio Aragón

Ing. Edgar Rubén Luque choque

Arturo



ÍNDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN..... 10

ABSTRACT 11

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 13

1.1.1. Problema general 13

1.1.2. Problemas específicos 13

1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 14

1.2.1. Hipótesis general..... 14

1.2.2. Hipótesis específicas 14

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 14

1.3.1. Objetivo general..... 14

1.3.2. Objetivos específicos 14

1.4. JUSTIFICACIÓN 15

1.4.1. Justificación ambiental y social 15

1.4.2. justificación científica 15

1.4.3. justificación económica 16



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	17
2.2. MARCO TEÓRICO.....	20
2.2.1. Historia del hidrogeno (Sanz Villuendas, 2010).....	20
2.2.2. Hidrogeno	22
2.2.3. Propiedades físicas del hidrogeno.....	24
2.2.4. Propiedades químicas del hidrogeno	26
2.2.5. Toxicidad del hidrogeno	28
2.2.6. Aplicaciones del hidrogeno.....	28
2.2.6.1. Industria Química	29
2.2.6.2. Industria electrónica	31
2.2.6.3. Industria	31
2.2.6.4. Industria	31
2.2.6.5. Otras aplicaciones.....	31
2.2.7. Procesos de obtención de Hidrogeno	34
2.2.8. Reactores de celdas electrolizadoras.....	42
2.2.9. Generador de hidrógeno de celda seca.....	43
2.2.10. Funcionamiento.....	44

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN	45
3.2. MATERIALES	45
3.2.1. Equipo	45
3.2.2. Materiales.....	45



3.2.3. Reactivos.....	45
3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	46
3.3.1. Diseñar y construir una celda seca.....	46
3.3.2. Determinar los parámetros óptimos en la generación de hidrogeno, como: tensión, corriente y temperatura por el modelo matemático.	70
3.3.3. cálculo de la concentración del catalizador	72
3.3.4. Determinar el volumen de producción del hidrogeno mediante el proceso experimental.	74
CAPITULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. RESULTADOS.....	75
4.1.1. Diseñar y construir una celda seca.....	75
4.1.2. Determinar los parámetros óptimos en la generación de hidrogeno, como: tensión, corriente y temperatura.	75
4.1.3. Optimizar el uso del catalizador (NaOH) en la celda seca.	82
4.1.4. Determinar el volumen de produccion del hidrogeno mediante el proceso experimental.	82
4.2. DISCUSIÓN.....	87
V. CONCLUSIONES.....	89
VI. RECOMENDACIONES	91
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXOS.....	95

Área: Tecnología de energías renovables.

Línea: Tecnología de energías renovables.

Fecha de sustentación: 09 de febrero de 2022



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Propiedades Físicas	26
Tabla 2 Componentes del reactor	53
Tabla 3 Variables de datos del diseño experimental.....	72
Tabla 4 Variables para el diseño experimental	72
Tabla 5 Efectos estimados para Y	76
Tabla 6 Análisis de Varianza para Y	76
Tabla 7 Coeficientes de regresión para Y	78
Tabla 8 Camino de Máximo Ascenso para Y	78
Tabla 9 Optimizar Respuesta	79
Tabla 10 resultados experimentales	82
Tabla 11 Resultados cinéticos.....	85
Tabla 12 concentración del catalizador con respecto al tiempo	86



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Distribución del consumo de hidrogeno por aplicación.	29
Figura 2: Formación iónica.....	35
Figura 3. Celda húmeda y celda seca.....	43
Figura 4. Proceso de generación de gas hidrógeno.....	44
Figura 5. Partes de una celda seca	47
Figura 6. Placas de compresión	48
Figura 7. Electrodo de conexión.....	50
Figura 8. Electrodo separador de gas.....	51
Figura 9. Electrodo separador de gas.....	51
Figura 10. Juntas	52
Figura 11. Diagrama de flujo del sistema de la formación del hidrogeno.....	56
Figura 12. Burbujeador.....	58
Figura 13. Presentacion del equipo.....	59
Figura 14. Placa de compresión.....	59
Figura 15. Electrodos neutros	60
Figura 16. Recorte y perforación de placas en forma octogonal	61
Figura 17. lectrodo de conexión	61
Figura 18: Juntas aislante de electrodos	62
Figura 19. Goma aislante de las tapas	62
Figura 20. Preparación de componentes	63
Figura 21. Montaje del reactor.....	63
Figura 22. Colocación de juntas	64
Figura 23. Ajuste del reactor	65
Figura 24. Ajuste de pernos	65



Figura 25. Electrodo separador de gases y el vacío entre celdas	67
Figura 26. Peso del catalizador	74
Figura 27. Equipo de generador de hidrogeno.....	75
Figura 28. Diagrama de Pareto	80
Figura 29. Contornos de superficie de la respuesta estimada.....	81
Figura 30. Interacción para rendimiento.....	81
Figura 31. Volumen de producción vs concentración	83
Figura 32. Concentración y tiempo	86



RESUMEN

En la siguiente investigación tiene como objetivo determinar la cinética de formación de hidrogeno mediante el proceso de electrolisis alcalina del agua en una celda seca. Aplicando materiales alternativos. Se rectificó la corriente alterna de 220V a 198 V de corriente continua con un diodo puente rectificador de 50 amperios.. Por lo tanto, los 198 V dividido por 4, diferencia de potencial con un resultado de 49.5 equivalente a 49 saltos entre los electrodos neutros, y por consiguiente 48 placas por lado sumando 96 placas neutras interpuestas entre los polos en el orden de (- nnn+nnn-) respectivamente. Las juntas de geometría circular en forma de anillo de 3.5 mm de espesor. La misma en el ensamblado se comprime a 3 mm. En la construcción de la celda se emplearon electrodos de geometría octogonal de acero inoxidable AISI 306. Se introdujeron los datos de la corriente de 10 – 16 amperios, tensión constante de 198 voltios y catalizador de (1- 2) % en peso al programa de estatigraf centurión y modelo matemático para optimizar estos parámetros y alcanzar el máximo ascenso de la producción de hidrogeno. Se analizó formación del hidrogeno a una temperatura de partida de 16°C hasta llegar a 70°C. Llegando así a Los resultados experimentales muestran la eficiencia del reactor en la cinética de formación del hidrogeno en porcentaje de concentraciones de 0.9% en peso. Llegando a un resultado final en formación de hidrogeno de 2.7 s /400ml de hidrogeno. Equivalente a 9L/min. Y 4.5 L/min de oxígeno, el reactor en su funcionamiento produjo combustible renovable, operación ejercida a una temperatura máxima de 70°C. Los resultados experimentales de 13.5 L /min de ambos gases proporcionan datos cinéticos en cuanto a la velocidad de desaparición del agua resuelto por las ecuaciones cinéticas observando una pérdida de 4.1 ml / min.

Palabras clave: electrólisis, hidrogeno, celda seca, cinética química.



ABSTRACT

In the following investigation, the objective is to determine the kinetics of hydrogen formation through the process of alkaline electrolysis of water in a dry cell. Applying alternative materials. The alternating current was rectified from 220V to 198V direct current with a 50 amp bridge rectifier diode. Therefore, the 198V divided by 4, potential difference with a result of 49.5 equivalent to 49 jumps between the neutral electrodes, and therefore 48 plates per side adding 96 neutral plates interposed between the poles in the order of (-nnn+nnn-) respectively. The circular geometry gaskets in the form of a 3.5 mm thick ring. The same in the assembly is compressed to 3 mm. In the cell construction, octagonal geometry electrodes of AISI 306 stainless steel were used. estatigraf centurión and mathematical model to optimize these parameters and achieve the maximum rise in hydrogen production. Hydrogen formation was analyzed at a starting temperature of 16°C until reaching 70°C. Thus arriving at the experimental results show the efficiency of the reactor in the kinetics of hydrogen formation in percentage concentrations of 0.9% by weight. Reaching a final result in hydrogen formation of 2.7 s / 400ml of hydrogen. Equivalent to 9L/min. And 4.5 L/min of oxygen, the reactor in its operation produced renewable fuel, operation carried out at a maximum temperature of 70°C. The experimental results of 13.5 L/min of both gases provide kinetic data regarding the speed of disappearance of water resolved by the kinetic equations, observing a loss of 4.1 ml/min.

Keywords: Electrolysis, hidrógen, dry cell, chemical kinetics.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se realizó en el centro experimental curtiembre de salcedo dependencia de la facultad de ingeniería química de la universidad nacional del altiplano. Tomando estas instalaciones por tratarse de zona industrial en las cuales permiten proporcionar fuentes de alimentación de 220 V y 380 V y corrientes superiores a 30 amperios condiciones perfectas para determinar la cinética de formación del hidrogeno mediante el proceso de electrolisis del agua, se diseñó y se construyó un prototipo celda seca con placas en puestas en serie. Con placas de geometría octogonal. 99 en total debido a la tensión aplicada de 198 V. dicho voltaje dividido por 4 Volteos de diferencia de potencial permitió el diseño de las 99 placas de la cuales 96 son neutras, dos negativas y una positiva ensamblados en la siguiente forma (-nnn+nnn-), así mismo aplicando los datos como: concentración del catalizador de (1, 1.1, 0.9, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 2) %, corriente de 10- 16 amperios y temperatura de partida de 16- 70°C.

El diseño experimental se determinó por el programa estatigraf centurión tomando el modelo factorial (2k) donde la variable independiente es el agua destilada, y la variable dependiente es la producción de gas hidrogenoson. La optimización del catalizador, la corriente y la temperatura permiten ascender la respuesta (Y) producción del hidrogeno en un máximo de 2%. Por consiguiente, se tomó concentraciones de 0.9 % en peso de NaOH a criterio para evitar el consumo execivo de electricidad y optimizar la velocidad de reacción electroquímica. Reflejándose esta respuesta en la formación del hidrogeno de 9 L / min y una velocidad de consumo del agua d 4.1 ml/min.



1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A través del tiempo se ha considerado el empleo del hidrógeno como combustible para motores de combustión interna, debido a que la energía química del hidrógeno se transforma de forma limpia, pues el único subproducto es el agua. El hidrógeno es considerado uno de los portadores de energía más prometedoras del futuro, debido a que es el elemento más abundante en el universo, totalizando más del 70 %, además posee una alta eficiencia y puede ser usado para transporte, calor y generadores (Linares, 2007).

Uno de los procesos más importantes para la generación hidrógeno es la electrólisis, que consiste en romper las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno, utilizando electricidad. El uso de la electricidad, como fuente energética para la producción de hidrógeno es limpio y seguro (Linares, 2007).

1.1.1. Problema general

¿Cómo construir una celda seca de producción de hidrogeno y determinar la cinética de formación de hidrogeno?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿cómo diseñar y construir una celda seca?
- ¿cómo optimizar los parámetros de operación de una celda seca?
- ¿Cuál es la concentración optima de catalizador para obtener mayor producción de hidrogeno?
- ¿cómo determinar la cinética de formación del hidrogeno mediante el proceso experimental?



1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Hipótesis general

Utilizando una celda seca y optimizando los parámetros del proceso es posible determinar la cinética de formación del hidrogeno.

1.2.2. Hipótesis específicas

- Es posible diseñar y construir una celda seca de producción de hidrogeno que sea eficiente.
- Se optimizará los parámetros de operación de la celda seca.
- Se calculará la dosificación más optima de catalizador.
- Se determinará el volumen de formación de hidrogeno mediante el proceso experimental.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

Determinar la cinética de formación de hidrogeno por el proceso de electrolisis del agua en una celda seca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir una celda seca.
- Determinar los parámetros óptimos en la generación de hidrogeno, como: tensión, corriente y temperatura por modelo matemático.
- Optimizar el uso de catalizador (NaOH) en la celda seca.



- Determinar el volumen de formación de hidrogeno mediante el proceso experimental.

1.4. JUSTIFICACIÓN

1.4.1. Justificación ambiental y social

El incremento de la demanda mundial de energía y el uso desmedido de los combustibles de origen petrolíferos, y su inevitable agotamiento, hace necesario realizar investigaciones para obtener nuevas fuentes de energías renovables. Así mismo, los combustibles de origen petrolíferos, como el petróleo, son uno de los principales contaminantes del medio ambiente y generadores del calentamiento global al tener como sub producto gases de óxido de carbonatos y óxidos de sulfuros, estos gases forman una capa superficial alrededor de la tierra formando un escudo, el cual permite el paso de la radiación hacia la tierra, pero impide el retorno de la energía calorífica infrarroja hacia la atmosfera y al espacio por radiación. Seis son los gases responsables del 97% del efecto invernadero antropocéntrico como: vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃) y cloro fluoru carbonos , (Barboza, 2013).

1.4.2. justificación científica

Presentando este proyecto de investigación estamos aptos y prestos a seguir en esta carrera de quien optimiza mejor la producción del hidrogeno una celda seca. El hidrogeno (H₂) como fuente energética tiene grandes ventajas ambientales, donde su característica principal es que, es posible obtenerlo de diferentes fuentes como el agua e hidrocarburos (metano, petróleo y carbón). El método de electrolisis es el más usado, la celda seca es la más eficiente. De acuerdo a Morales y otros (2017) el potencial de



almacenamiento de H₂ es atractivo, ya que podría lograr un abastecimiento de 118,560 GWh por año de energía renovable.

1.4.3. justificación económica

En el presente proyecto de investigación se plantea, diseñar, construir una celda seca de producción de hidrogeno y obtener los parámetros óptimos para el proceso. Así mismo, la cinética de formación del hidrogeno en una celda seca. Los materiales y reactivos alternativos que componen la celda económicamente son accesibles en las ferreterías siendo una alternativa relativamente económica.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

(Sudrajat, (2018)) diseño un generador hibrido de hidrogeno multipistas de una celda húmeda y celda seca. Utilizaron como catalizador al hidróxido de potasio $K(OH)$ en las siguientes concentraciones: 5,6; 11,2; 16,8; 22,4 g/L, encontraron que la corriente aplicada se incrementa linealmente, aumentando la producción de oxígeno e hidrogeno. Para una concentración de 22,4 g/L produjeron un volumen de 230,3 ml/min de gas de oxígeno e hidrogeno. El voltaje que utilizaron fue de 12V.

Holgado (2012). En su trabajo de Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrógeno por electrólisis. utilizó la batería como fuente eléctrica y la combinación de placas $- n n n + n n n -$, ha realizado la prueba con el 1% de hidróxido de sodio, el indica que, solo con el 1% la intensidad del generador ya era de 17 amperios, y su sistema no está preparado para aguantar este valor o superior de intensidad. Durante la prueba, el fusible instalado en el circuito eléctrico hizo su función y cortó el paso de corriente, protegiendo el circuito.

(Reyes, 2018) realizaron el análisis de un generador de hidrogeno de una celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. Los experimentos lo realizaron en una celda seca conectada a una batería de 12 V con un sistema de protección de sobrecarga (fusible) y un amperaje de 3 A. Las celdas tienen la forma octogonal de 41,4 mm de longitud de cada lado y un espesor de 1 mm, utilizaron 7 placas; una placa de polaridad positiva, otra de polaridad negativa y 5 placas neutras. Las placas fueron de acero inoxidable AISI 304 debido a su capacidad anticorrosiva. El material aislante fue anillos de neopreno de diámetro 90 mm y espesor 3 mm. La placas de soporte de la celda



fueron de acrílico con un espesor de 1 cm sujetadas por tuercas de sujeción. Obtuvieron una producción de 0,19 L/min para 0,9 atm, 31,4 °C y un amperaje de 3 A.

(Joshi, 2015) produjeron hidrogeno con el fin de usarlo en la generación de energía eléctrica. Utilizaron K(OH) como catalizador en un 20 a 30 wt%, la temperatura típica del sistema fue de 70 a 100 °C y la presión de 1 a 30 bar, respectivamente, obteniendo un incremento en la producción de hidrogeno. El volumen producido fue de 1,5 Litros por minuto para 2,4 Amps. de corriente aplicado. Con la optimización en las técnicas de producción de hidrógeno e incluyendo cinco uniones más, lograron producir 7.2 Litros por minuto de hidrógeno. Además, el gas de hidrógeno producido puede ser un aporte a las celdas de combustible, que es la principal área de interés para los investigadores en la industria automotriz.

(Rivera, 2015) utilizó una celda seca electrolítica para la obtención de hidrogeno con aguas residuales de la empresa Muebles de León, primeramente caracterizaron las aguas residuales y determinaron los parámetros óptimos para la operación de la celda seca. Utilizo placas de acero inoxidable AISI 304 para un volumen de 693 ml de la celda, la acidez del agua residual fue de pH 5, para la medición de la concentración de hidrogeno (H₂) utilizo el sensor MQ-8 con un rango de 100 a 10000 ppm de H₂. Obtuvo 730 ppm de hidrogeno al lapso de 1 minuto, para un voltaje de 12 V y un amperaje de 6 A, sin embargo, para un amperaje de 8-9 A se alcanzo un producción de 12080 ppm de gas de hidrogeno.

(Sopandi, 2015) estudiaron el efecto del espesor del electrodo en la producción de HHO (Hidrogeno Hidrogeno Oxigeno) en una celda humeda usando al NaHCO₃ (bicarbonato de sodio) como catalizador. Usaron electrodos de acero inoxidable AISI 304, donde, los espesores variaron de 0,8 mm, 1 mm y 1,2 mm con NaHCO₃ como



catalizador. Los mejores resultados fueron al usar un electrodo de 1 mm de espesor; con un potencial de 59,11 watts; la tasa de producción de gas HHO fue de 0,00054 kg/s y la eficiencia del generador HHO fue de 9,42%.

(Romero & Gualan, 2014) implementaron un generador de hidrogeno de celda seca en un vehículo Chevrolet Stream 1,6 L. Analizaron diferentes soluciones con el fin de optimizar la producción de hidrogeno. El hidrogeno obtenido se inyecta a un vehículo Chevrolet Stream. Concluyeron que el uso de hidrogeno disminuye las emisiones contaminantes al ambiente, la producción de hidrogeno es proporcional al numero de placas y a la densidad de corriente aplicado.

(Julke, Yáñez, & González, 2013) evaluaron diferentes tipos de acero para la evolución de hidrogeno en KOH. Utilizaron los siguientes aceros comerciales: A36, 430 y 304, como electrodos catódicos para obtener hidrogeno. El estudio electroquímico lo realizaron en una celda de 3 electrodos y donde realizaron los siguientes análisis, cronoamperometria y curvas voltamperometrias en diferentes concentraciones de KOH (5 y 25% m/m). Resultando la mejor opción el acero comercial 304 en una concentración de 25% m/m, donde, se obtuvo mayor volumen de hidrogeno a bajos potenciales.

(Gollei, 2014) obtuvo hidrogeno en una celda seca, analizando las variables de concentración de electrolito, densidad de corriente, distancia entre placas, producción de gas. Utilizo como catalizador el K(OH). La celda produjo 3 litros de gas de hidrogeno por minuto, tiene 5,35 MMW (mililitros/minuto/watt), una concentración de 7 g/l de K(OH) y 140 watt para tener los máximos rendimientos de producción de hidrogeno.

(Velasquez & Quinceno, 2013) diseñaron un sistema de generación de hidrogeno por electrolisis utilizando una celda de combustible de membrana de intercambio protónico que fue diseñado y construido en la Universidad Tecnológica de Pereira.

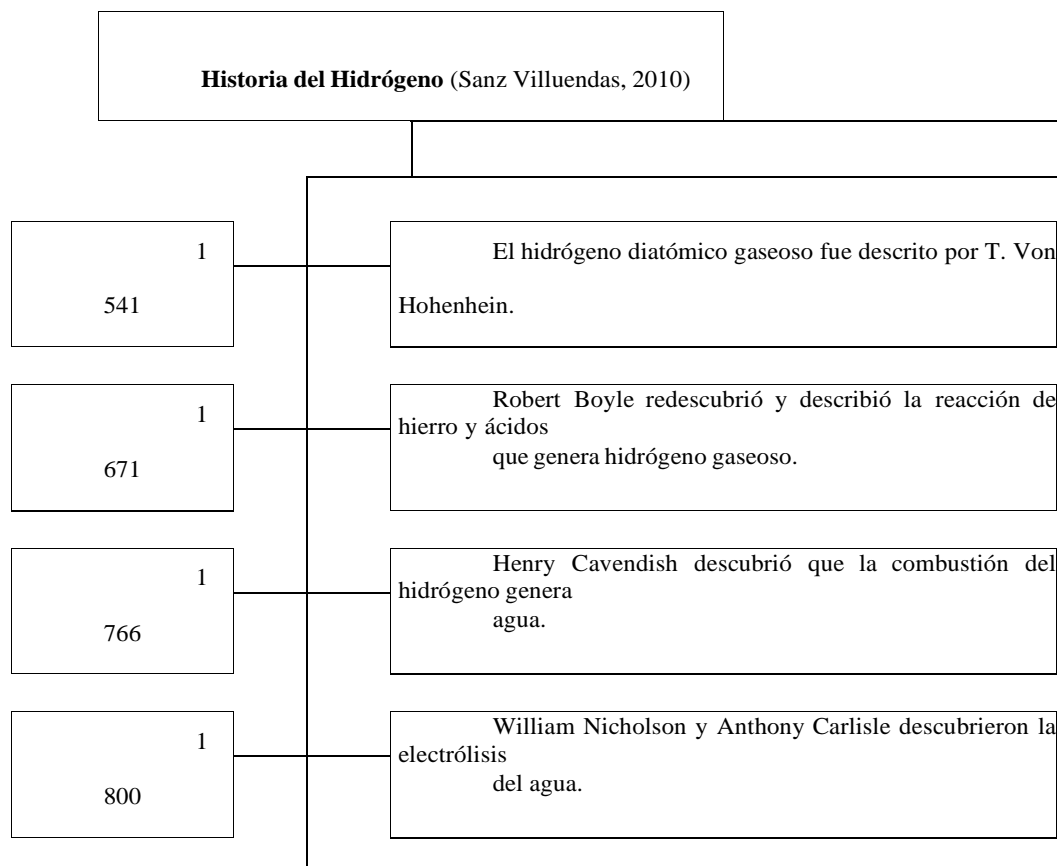


Usaron como electrodo la Membrana de Intercambio de Protones (PEM), placas bipolares y difusores de gas. Alcanzaron una generación de 350 cm³/min, en un área de 50 cm². Así mismo, diseñaron un sistema de almacenamiento de hidrogeno.

Barrientos & Bernabé (2013) investigaron la producción de hidrogeno por electrolisis alcalina utilizando electrocatalizadores de aleación ternaria. Utilizaron una solución alcalina al 30% en peso de hidróxido de potasio (KOH), los electrodos fueron compuestos de Ni, Ag y Mo electrodepositados en piezas de acero inoxidable AISI 304. Obtuvieron una producción de 119,6 cm³ de hidrogeno en 9 min en las siguientes condiciones un electrodo de composición 4,03 ppm de Ag; 0,0058% Mo y 0,088% Ni y una densidad de corriente de 200 mA/cm².

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Historia del hidrogeno (Sanz Villuendas, 2010).





838	1	Christian Friederich Schoenbein descubrió el efecto de la pila de combustible.
874	1	Julio Verne predijo “el agua se usará como combustible”.
920	1	Rodolf Erren usó hidrógeno en un automóvil.
958	1	La NASA usa hidrógeno en sus cohetes.
970	1	John Bockris acuña el término “Economía del Hidrógeno”.
990	1	En Alemania se crea una Planta Hidrógeno-Solar. La compañía Shell de Alemania abre estaciones de H2.
999	1	Omar Solorza Feria funda la SMH (Sociedad Mexicana del Hidrógeno).
000	2	La compañía Ballard Power Systems presentó el primer tipo de pilas de combustible PEM para automóviles.
003	2	George W. Bush designa 1000 millones de dólares para la tecnología del hidrógeno.

En el diagrama se mostró algunos datos en torno a la historia del hidrógeno La energía es necesaria para el desarrollo de los países, asegurar el futuro energético es asegurar el desarrollo en el futuro. Nuestro país vecino EEUU ha realizado inversiones millonarias en el desarrollo e investigación en torno al hidrógeno. Esta información es



motivadora para desarrollar también nuestra tecnología e investigación sobre la energía del hidrógeno.

En el siglo XX por la preocupación por el medio ambiente y los posibles efectos sobre el clima; el agotamiento de los combustibles fósiles; ha traído consigo un gran impulso, sobre todo en la industria automovilística, ya que el hidrógeno es una alternativa a los serios problemas de contaminación que afronta la humanidad. También el interés de las industrias aeroespacial y automovilista por el hidrógeno se debe a la llamada pila de combustible, donde el hidrógeno puede quemarse con el oxígeno, transformándose la energía de la combustión en electricidad. Este proceso fue ya descubierto en 1839 por el galés William R. Grove, pero su desarrollo comenzó en la década de los 1960 por la NASA para producir electricidad y agua en algunas de sus misiones espaciales. Actualmente, un gran número de prototipos de las principales marcas de automóviles y autobuses ensayan pilas de combustible de tipos y combustibles diversos. (Romero & Gualan, 2014)

2.2.2. Hidrogeno

El hidrógeno es el elemento más ligero de la naturaleza, así como el más abundante en el universo, totalizando más del 70%. Se halla en las estrellas jóvenes, en polvo interestelar y en las enormes nubes de gas suspendidas en el espacio, pero la mayor parte de él se encuentra formando diversos compuestos químicos. Presenta muy baja solubilidad en líquidos, pero una alta solubilidad en metales, especialmente en paladio.

El Hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido y no es tóxico, también se quema en el aire formando una llama azul pálido casi invisible. Es el más ligero de los gases conocidos en función a su bajo peso específico con relación al aire. Por esta razón,



su manipulación requiere de cuidados especiales para evitar accidentes. (AMT-Solar,2012).

El Hidrógeno es particularmente propenso a fugas debido a su baja viscosidad y a su bajo peso molecular (peso molecular = 2.016). Es un combustible con un alto contenido energético, que proporciona 28.6696 Kcal por cada gramo, frente a 11.953 Kcal/gr del gas natural, 10.780 Kcal/gr de la gasolina, 10.932Kcal/gr del butano y 10.0792 Kcal/gr del propano. (AMT-Solar, 2012).

El hidrógeno a pesar de su inmensa abundancia no se encuentra disponible de forma directa, pero podemos encontrarlo en forma molecular; encontrándolo en gran cantidad de forma 7 combinada en su mayor parte por agua. Para producirlo se lo hace de forma industrial a partir de combustibles fósiles; según los países y su disponibilidad de materias primas, se emplean el gas natural, el carbón, derivados del petróleo y solo pocos se obtienen a partir del agua por un proceso de electrolisis. (AMT-Solar, 2012).

2.2.2.1. Usos

El empleo más importante del hidrógeno es en la síntesis del amoniaco. La utilización del hidrógeno está aumentando con rapidez en las operaciones de refinación del petróleo, como el rompimiento por hidrógeno (*hydrocracking*), y en el tratamiento con hidrógeno para eliminar azufre. Se consumen grandes cantidades de hidrógeno en la hidrogenación catalítica de aceites vegetales líquidos insaturados para obtener grasas sólidas. La hidrogenación se utiliza en la manufactura de productos químicos orgánicos. Grandes cantidades de hidrógeno se emplean como combustible de cohetes, en combinación con oxígeno o flúor, y como un propulsor de cohetes impulsados por energía nuclear. (LENNTECH, 2013).



2.2.3. Propiedades físicas del hidrogeno

En condiciones estándar de presión y temperatura el hidrógeno es un gas diatómico incoloro, inodoro, insípido con la fórmula molecular H_2 . Es el elemento químico más liviano y uno de los más abundantes del universo, constituyendo el 75 % de la materia visible, uno de los principales elementos que constituyen el agua y toda la materia orgánica. (Godula, 2014).

El hidrógeno es el segundo elemento de la tabla periódica que posee los puntos de ebullición y fusión más bajos después del helio. A presión atmosférica, se encontrará en estado líquido por debajo de su punto de ebullición ($-252,78\text{ }^{\circ}\text{C}$) y, en estado sólido, por debajo de su punto de fusión ($-259,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Así pues, el hidrógeno líquido es un líquido criogénico porque su temperatura se encuentra por debajo de $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Godula, 2014).

Esto supone un inconveniente, pues lo que se suele buscar en los combustibles es que a temperatura ambiente se encuentren en estado líquido, de manera que ocupen menos espacio que los combustibles gaseosos, además de ser más fáciles de transportar. Como resultado, el hidrógeno como combustible automotriz se almacena más comúnmente como un gas presurizado que como un líquido criogénico en un tanque a bordo (Godula2014).

Aunque el punto de ebullición de una sustancia pura aumenta a medida que se eleva la presión, en el caso del hidrogeno sólo es posible aumentarlo hasta un máximo de $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplicando aproximadamente 13 bar. Bajo condiciones estándar la densidad del hidrógeno gaseoso (H_2) es $0,08375\text{ kg m}^{-3}$ y el volumen específico es $11,940\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}$. En condiciones estándar la densidad y el peso específico del hidrógeno puede calcularse usando la ley del gas ideal $\rho=P/RT$.



A altas presiones, el hidrógeno se desvía significativamente del comportamiento termodinámico de un gas ideal, la densidad del hidrógeno a 5 MPa es 2,9 % menor y a 10 MPa 5,7 % menor que la calculada a partir de la ley del gas ideal. Esto se conoce como factor de compresibilidad, y puede ser medido directamente. (Godula, 2014).

El hidrógeno gaseoso tiene una gravedad específica de 0,0696 a 20 °C y 1 atm y por tanto es aproximadamente 7 % de la densidad de aire. El hidrógeno líquido tiene una gravedad específica de 0,0708 en el punto de ebullición y es aproximadamente el 7 % de la densidad del agua. Una fuga de hidrógeno líquido, el cual es 59 veces más pesado que el aire, se evaporaría y se difundiría rápidamente en el aire del ambiente debido al bajo punto de ebullición y al peso específico del hidrógeno. (Godula, 2014)

Al ser empleado como combustible se consigue fácilmente una combustión completa, además posee un alto poder calorífico, sin embargo, su manipulación requiere de ciertos cuidados especiales debido a que su bajo peso molecular y baja viscosidad lo hacen propenso a fugas. (Godula, 2014)

Tabla 1*Propiedades Físicas*

Propiedad	Unidades	Valor
Peso molecular	Mol	2,016
Punto de fusión	K	13,96
Punto de ebullición (a 1 atm)	K	14,0
Densidad en estado sólido (a 4,2 K)	g cm ⁻³	0,089
Densidad en estado líquido (a 20,4 K)	g cm ⁻³	0,071
Densidad en estado gaseoso (a 0 °C y 1 atm)	g l ⁻¹	0,0899
Conductividad térmica del gas (a 25 °C)	cal cm s ⁻¹ cm ⁻² °C ⁻¹	0,00044
Viscosidad del gas (a 25 °C y 1 atm)	cP	0,0089
Calor de combustión bruto (a 25 °C y 1 atm)	kJ g ⁻¹ mol ⁻¹	265,0339
Calor de combustión neto (a 25 °C y 1 atm)	kJ g ⁻¹ mol ⁻¹	241,9292
Temperatura de autoignición	K	858
Límite de inflamabilidad en oxígeno	%	4–94
Límite de inflamabilidad en aire	%	4–74

Fuente: (Godula, 2014)

2.2.4. Propiedades químicas del hidrogeno

Debido a que el hidrógeno es un elemento altamente reactivo, solo puede encontrarse en compuestos químicos y para poder ser extraído se requiere de un consumo considerable de energía. (Godula, 2014)

El hidrógeno forma una amplia gama de compuestos con el carbono. Millones de hidrocarburos son conocidos como componentes orgánicos. El gas natural y el petróleo crudo son algunos de ellos. Estos se originaron biológicamente y muchos se transformaron a través del tiempo.



El hidrógeno forma componentes químicos e inorgánicos con otros elementos. El agua es el componente químico que el hidrógeno forma con el oxígeno. Al igual que el hidrógeno, el agua pura es incolora, inodora e insípida. (Godula, 2014)

No es ácido ni básico. El agua es el componente más abundante en la superficie terrestre. El agua es una fuente renovable de hidrógeno combustible. La combustión del hidrógeno forma la misma cantidad de agua que lo produjo, sin la existencia de dióxido de carbono o contaminantes, por ello el hidrógeno combustible se considera como un portador de energía limpia prometedor para el futuro.

El hidrógeno puede reaccionar con componentes químicos y orgánicos. Gracias a esta propiedad contribuye a una amplia gama de aplicaciones de manufactura. La hidrogenación es usada para refinamiento en los procesos del petróleo y para endulzantes en procesos de comida. Fertilizantes de amoníaco son hechos por la reacción química del hidrógeno con una fuente de nitrógeno gas en el aire. El hidrógeno es un reductor efectivo para remover el oxígeno (formando agua) de los óxidos metálicos para producir metales. También es empleado para remover químicamente impurezas no deseadas en productos industriales. (Godula, 2014)

Finalmente, el hidrógeno puede formar compuestos con otros elementos y componentes a través de enlaces iónicos. Tomando una carga positiva parcial, el hidrógeno se une a elementos más electronegativos tales como halógenos (por ejemplo, F, Cl, I, y Br). De forma similar, al tomar una carga negativa parcial, forma compuestos con materiales más electropositivos, como metales y metaloides, y estos se conocen como varios tipos de hidruros, algunos de los cuales resultan ser medios de almacenamiento de hidrógeno bastante interesantes. (Godula, 2014)



2.2.5. Toxicidad del hidrogeno

El hidrógeno en si no resulta tóxico, pero puede actuar como asfixiante ya que desplaza el oxígeno que se encuentra en el aire.

Los niveles de oxígeno por debajo del 19,5% resultan insuficientes para los seres humanos. Los efectos de la deficiencia de oxígeno pueden incluir la hiperventilación, una disminución de las capacidades mentales, coordinación muscular deteriorada, falta de juicio, depresión, inestabilidad emocional y fatiga. Con concentraciones inferiores al 12% de oxígeno, se produce Inconsciencia inmediata, sin síntomas de alerta anteriores. Es por eso que se debe tener precaución en caso de manipular hidrógeno en recintos pequeños y cerrados, ya que una fuga podría llegar a causar la muerte por asfixia, además de ser una mezcla inflamable, con los riesgos que comporta su inhalación. Debe tenerse en cuenta, además, que el resto de gases que puedan encontrarse mezclados con el hidrógeno, si éste ha sido extraído de otros combustibles fósiles, como por ejemplo nitrógeno, monóxido de carbono, bióxido de carbono y otros, pueden también actuar como asfixiadores desplazando el oxígeno. Además, el monóxido de carbono es un gas venenoso, con lo que se presenta como un elemento peligroso para la salud. (Godula, 2014).

2.2.6. Aplicaciones del hidrogeno

Los principales sectores de consumo actual de hidrógeno se muestran en la Fig. N° 2. Hoy en día, el hidrógeno se utiliza principalmente en la producción de amoníaco, refinado del petróleo y síntesis de metanol. También se utiliza en el programa espacial de la NASA como combustible de las lanzaderas aeroespaciales. Sin embargo, aparte de las aplicaciones convencionales, es necesario destacar el papel que las pilas de combustible jugarán en el consumo de hidrógeno en un futuro próximo como elementos intermediarios para la generación de energía eléctrica “limpia”. (Isaac, 2012)

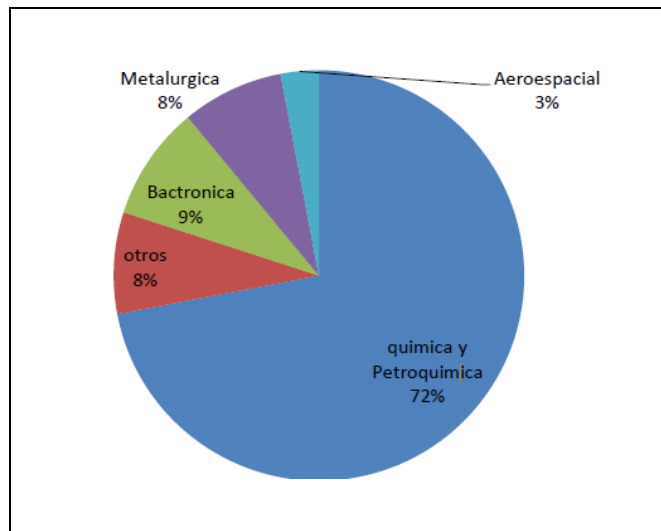


Figura 1: Distribución del consumo de hidrogeno por aplicación.

Fuente: (<http://riunet.upv.es/handle/10251/16804>, s.f.)

El hidrógeno no es un producto barato, por lo que, a pesar de sus propiedades como combustible, sus aplicaciones han sido otras y su producción no demasiado elevada. A continuación, se comentan los principales usos del hidrógeno, según el tipo de aplicación.

2.2.6.1. Industria Química

- **Industria del refino de petróleo:** Tiene muchas aplicaciones entre las que destaca el hidrocrackeo, donde su función es la de purificar una corriente de hidrocarburos eliminando de ésta el azufre y el nitrógeno. En los procesos de refinería, su función principal la obtención de fracciones ligeras de crudo a partir de fracciones pesadas, aumentando su contenido en hidrógeno y disminuyendo su peso molecular. De forma simultánea pueden eliminarse elementos indeseables como azufre, nitrógeno y metales con el objeto de cumplir la normativa en la formulación de los distintos productos de la refinería. (Pelaéz, 2001)



- **Síntesis inorgánica:** El hidrógeno es imprescindible en procesos de importancia comercial como por ejemplo la producción de ácido clorhídrico, peróxido de hidrógeno, hidroxilaminas, etc. Sin embargo, destaca de forma sobresaliente la síntesis de amoníaco, para la cual es imprescindible el uso de H_2 , junto con el N_2 , en la formación de dicha molécula, que posteriormente se empleará en la obtención de sales de amonio para fertilizantes, ácido nítrico, nitratos, etc. (Madrídejos, 2007)
- **Síntesis orgánica:** En química orgánica el hidrógeno participa en un gran número de procesos de hidrogenación o reducción para la obtención de productos químicos e intermedios. Destaca la utilización del denominado gas de síntesis, una mezcla formada principalmente por CO y H_2 , para la obtención de otros muchos productos químicos, principalmente metanol, pero también oxoalcoholes, isocianatos, ácido acético, acetatos, combustibles sintéticos, metano, etileno, etc. (Madrídejos, 2007)
- **Gas de síntesis:** Está compuesto por CO e hidrógeno. Este gas de síntesis se emplea como producto de partida en la síntesis de muchos compuestos orgánicos. Entre ellos destaca el metanol. (Pelaéz, 2001)
- **Síntesis de Amoniaco:** Para ello se utiliza una mezcla de elevada pureza de nitrógeno e hidrógeno que reacciona en presencia de hierro como catalizador. El volumen de amoniaco producido es muy grande y en continuo crecimiento. Sus usos son muy variados: fertilizantes, explosivos, plásticos, fibras, etc. (Pelaéz, 2001)



2.2.6.2. Industria electrónica

El hidrógeno se usa para la fabricación de ciertos componentes electrónicos. Por ejemplo, para producir semiconductores dopados, se depositan en una matriz de silicio cantidades traza de elementos (Si, As, Ge, etc.) en forma de hidruros, mezclados con una corriente de hidrógeno de elevada pureza. (Isaac, 2012)

2.2.6.3. Industria metalúrgica

El hidrógeno se utiliza en este sector industrial para conseguir atmósferas anti-oxidantes, necesarias en ciertos procesos, o para tratamientos térmicos. Se emplea como agente reductor para la producción de hierro (reducción directa del mineral) y en procesos de producción de otros metales no-férricos (como cobre, níquel, cobalto, molibdeno, uranio, etc.). También es habitual añadir diferentes proporciones de hidrógeno a las corrientes gaseosas empleadas en diferentes procesos de corte y soldadura, tratamientos superficiales (atomización) y tratamientos en atmósferas especiales (templado, sinterización, fusión, flotación de vidrio, etc.). (Isaac, 2012)

2.2.6.4. Industria alimenticia

Se utiliza para modificar propiedades en las grasas, aceites y ácidos grasos, como son el punto de fusión, estabilidad química y disminución del color y olor.

2.2.6.5. Otras aplicaciones

En la industria del vidrio se utiliza para el pulido térmico del vidrio, dando lugar al acabado superficial excepcional. En la industria agroalimentaria el hidrógeno es utilizado para la modificación de propiedades fisicoquímicas, tales como, punto de fusión, estabilidad química y disminución de color y olor, en grasas, aceites y ácidos grasos. En muchos otros sectores se utiliza, aunque en menores volúmenes: industria farmacéutica,



química fina, electrónica, obtención de peróxido de hidrógeno (utilizado en la industria papelera), etc. (Pelaéz, 2001).

2.2.6.6. Aplicaciones energéticas

El hidrógeno puede quemarse directamente para la generación de electricidad mediante turbinas de gas y ciclos combinados o utilizarse como combustible, tanto de motores de combustión interna como en pilas de combustible. Las principales ventajas de este compuesto se centran en las elevadas eficacias que pueden alcanzarse y en que el único producto de su combustión es vapor de agua, sin generar NOx, si se controla la temperatura para inhibir la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno atmosféricos, y de CO₂, evitando la contribución al calentamiento global. En relación con la utilización del hidrógeno como combustible, hay tres aplicaciones posibles: (Pelaéz, 2001).

- **Combustión directa:** La combustión del hidrógeno con oxígeno puro conduce a la formación de vapor de agua puro: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$, obteniéndose una temperatura de los gases superior a 3.000 °C en la zona de la llama. Sin embargo, esto conlleva problemas con los materiales de los equipos empleados y la generación de NOx. Para solventar estos inconvenientes, puede recurrirse a la inyección de agua en la corriente de hidrógeno, lo que permite ajustar la temperatura del vapor al valor deseado, o bien al empleo de catalizadores basados en platino, consiguiendo que la reacción tenga lugar a temperaturas desde ambiente hasta 500 °C. Los gases de combustión producidos pueden llevarse directamente a una turbina de gas o a un ciclo combinado de turbina de vapor/turbina de gas para la generación de electricidad. (Barrientos & Bernabé 2013)
- **Combustible en motores:** Esta aplicación se encuentra tradicionalmente en su empleo en la industria aeroespacial, como combustible de vehículos espaciales

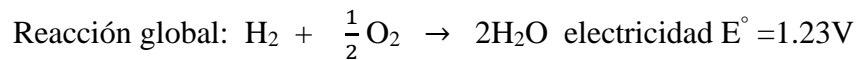
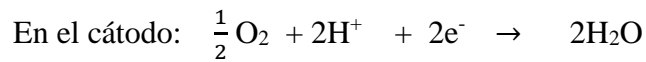
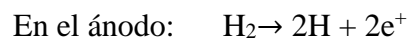


(además de servir como suministro de energía para los ordenadores y sistemas de soporte en el espacio), obteniendo agua como “subproducto”. Así, los programas espaciales son los mayores consumidores de hidrógeno líquido, habiendo adquirido gran experiencia en su manejo que puede ser la base de futuros desarrollos en otros campos. Sin embargo, esta opción es también aplicable a vehículos de transporte por carretera. De hecho, las investigaciones actuales se están centrando tanto en motores de combustión externa (motores Stirling) como interna, para vehículos de transporte terrestre, aéreo y marítimo. El uso de hidrógeno en motores de combustión interna es un campo que está recibiendo cada vez más interés, siendo unos 20% más eficaces que los que emplean gasolina, debido a las características del hidrógeno (elevada difusividad, amplio intervalo de inflamabilidad y alta temperatura de auto-ignición). (Barrientos & Bernabé 2013)

- **Pilas de combustible:** La revolución energética que supone la economía del hidrógeno se basa en el uso de este gas por medio de las llamadas pilas de combustible, en las que se combina, por vía electroquímica, con el oxígeno para la producción de una corriente eléctrica. Junto con la utilización de motores eléctricos y las baterías de nueva generación serán los sustitutos de los actuales motores de combustión interna y las instalaciones de combustión locales para el abastecimiento de necesidades tanto estacionarias (domésticas e industriales) como móviles (vehículos y transporte). Las pilas de combustible (Fig. N°) son sistemas electroquímicos en los que la energía de una reacción química se convierte directamente en electricidad. Una pila de combustible consiste en un ánodo en el que se inyecta el combustible (comúnmente hidrógeno) y un cátodo en el que se introduce un oxidante (normalmente aire u oxígeno). Los dos electrodos de una pila de combustible están separados por un electrolito conductor de iones.



Electroquímicamente, de acuerdo con las semireacciones Los reactivos se transforman. (Barrientos & Bernabé 2013)



Se genera de esta forma una corriente eléctrica entre ambos electrodos que, a diferencia de lo que ocurre en una pila o batería convencional, no se agota con el tiempo de funcionamiento ni necesita ser recargada, sino que se prolonga mientras continúe el suministro de los reactivos. Así pues, se transforma la energía química, almacenada en el enlace H-H de la molécula H₂, en energía eléctrica y vapor de agua. Esta transformación utiliza directamente la energía libre disponible en el combustible a su temperatura de operación y no está limitada por el ciclo de Carnot, alcanzando rendimientos superiores a los procesos convencionales. (Barrientos & Bernabé 2013)

2.2.7. Procesos de obtención de Hidrogeno

En la actualidad, aproximadamente el 96% de la producción mundial de hidrógeno industrial se obtiene a partir de materias primas fósiles, principalmente por reformado de combustibles fósiles con vapor de agua [28]. El mundo entero produce, almacena, transporta y usa 550 mil millones de metros cúbicos por año provenientes en casi un 48% del reformado de gas natural, 30% del petróleo, y el 18% del carbón. El proceso de reformado se conduce a alta temperatura (1000 ~ 1300 K) bajo presión de 3-25 bar en presencia de un catalizador para producir una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono, y una cantidad relativamente pequeña de dióxido de carbono. La reacción es fuertemente endotérmica, por lo que es necesario un aporte suplementario de calor para

que tenga lugar la reacción. A continuación, se hace un breve resumen de las tecnologías más estudiadas en la actualidad para la producción de H_2 . (Herguido, Corella, & Gonzalez-Saiz, 1992).

2.2.7.1. Electrólisis del agua

Con la electrólisis el agua se descompone en sus componentes elementales mediante la aplicación de energía eléctrica. La electrólisis a menudo se considera como el proceso ideal para la producción de hidrógeno debido a que es el único que no se basa en el uso de combustibles fósiles. Además, se obtiene un hidrógeno de alta pureza y resulta factible tanto a pequeña como a gran escala.

La producción de hidrógeno por electrólisis es una tecnología madura, basada en un proceso simple y fundamental, es bastante eficiente y no involucra partes móviles. Resulta adecuada para la producción de hidrógeno a gran escala. (Sherif, 2014).

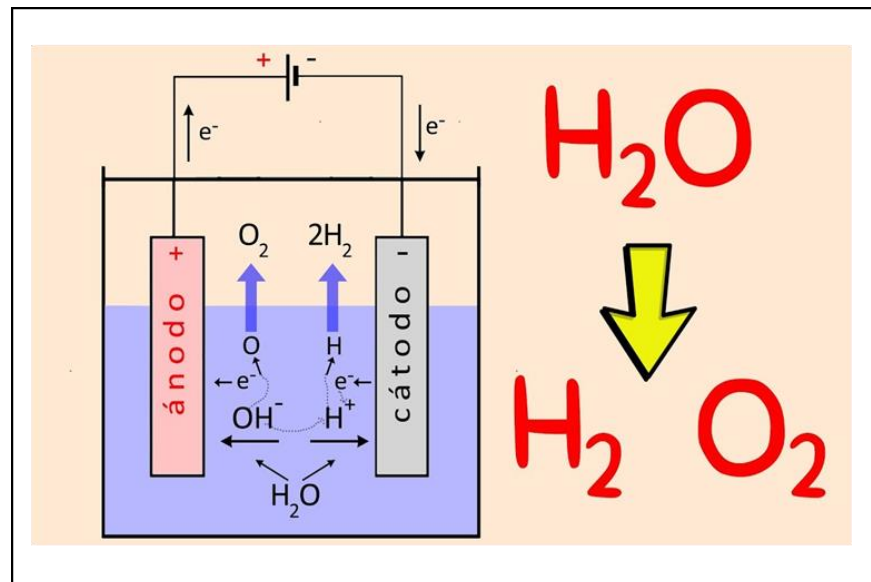


Figura 2: Formación iónica

Fuente: <http://ie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0613t.pdf>.



La única desventaja de la electrólisis es la cantidad considerable de energía eléctrica necesaria para el proceso. Si bien la electricidad puede ser generada usando fuentes limpias y renovables, existen productores que se consideran líderes en la economía del hidrógeno y que emplean energía nuclear para producir hidrógeno a bajo costo, esto solo deja una cantidad considerable de desperdicios tóxicos y se aparta totalmente del propósito de una economía del hidrógeno limpia. (Barrientos & Bernabé 2013)

Actualmente varias tecnologías de electrólisis se encuentran en desarrollo como la electrólisis alcalina avanzada, esta emplea nuevos materiales para membranas y electrodos incrementando la eficiencia, el proceso electrolítico de polímero sólido (SPE), este emplea una membrana de intercambio iónico conductora de protones como electrolito y la electrólisis de vapor a alta temperatura, opera entre 700°C y 1 000°C y emplea un cerámico conductor de iones de oxígeno como electrolito. Una planta de electrólisis puede operar en un amplio rango de capacidades de operación lo que convierte a la electrólisis en un proceso interesante para acoplarse con fuentes de energía renovables, particularmente con fotovoltaicas. (Genovese, 2009)

2.2.7.2. Reformado con vapor

El reformado es el método más empleado a nivel mundial para el reformado de hidrocarburos en plantas de producción de hidrógeno de gran escala. Combinando vapor a alta temperatura y metano, es posible extraer el hidrógeno de combustibles fósiles. A pesar que se produce dióxido de carbono, su localización es centralizada lo que deja abierta la opción del secuestro de carbono (se debe tener en cuenta que esta es una tecnología que no se ha probado y que no existe seguridad demostrada a largo plazo).



El proceso es bastante barato y el calor producido puede ser aprovechado (cogeneración). Este método resulta bastante prometedor como una tecnología eficiente y barata que puede funcionar con la infraestructura existente, sin embargo, no se puede ignorar las emisiones generadas en su uso. (Herguido, Corella, & Gonzalez-Saiz, 1992)

2.2.7.3. Gasificación del carbón

La producción del hidrógeno a partir de la gasificación del carbón consiste en tres etapas:

- Tratamiento del carbón con vapor a alta temperatura (1 330°) para producir el gas de síntesis.
- Una conversión de cambio catalítico de CO a H₂ adicional.
- Purificación del hidrógeno obtenido.

En el primer paso, el carbón es separado químicamente a una alta temperatura por vapor a alta presión para producir gas de síntesis, de acuerdo a la siguiente reacción:

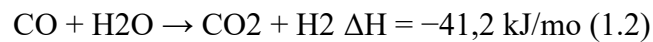


El calor requerido para la gasificación proviene de la adición controlada de oxígeno, esto permite la oxidación parcial de una pequeña parte del carbón.

Debido a esto la reacción debe llevarse a cabo en un gasificador con soplador de aire o de oxígeno. El oxígeno suministrado al gasificador se emplea para reducir la formación de NO_x y hacer el proceso más compatible para el secuestro del dióxido de carbono.



En la segunda etapa, el gas de síntesis pasa a través de un reactor de cambio, convirtiendo una parte del monóxido de carbono en dióxido de carbono y produciendo hidrógeno adicional:



En la tercera etapa, el hidrógeno producido es purificado. La absorción física remueve el 99 % de impurezas. El carbón es una fuente de energía atractiva debido a su abundancia en los Estados Unidos, Asia y otras partes del mundo a precios bajos y regularmente estables. La gasificación del carbón es una tecnología empleada actualmente para la producción del hidrógeno, sin embargo, en el futuro serán necesarias algunas consideraciones técnicas y económicas adicionales para capturar y almacenar el CO₂. (Herguido, Corella, & Gonzalez-Saiz, 1992)

2.2.7.4. Gasificación y reformado de biomasa

La biomasa ha demostrado ser una fuente de energía relativamente limpia y casi neutra en cuanto a emisiones de carbono. Los residuos agrícolas, la materia orgánica, madera y otras fuentes de biomasa pueden calentarse en una atmósfera controlada sin la presencia de oxígeno.

La biomasa requiere de una preparación que involucra el calentamiento de la biomasa a altas temperaturas en un reactor presurizado. Este proceso descompone y oxida parcialmente la biomasa, produciendo un gas de síntesis, rico en hidrógeno y que contiene monóxido y dióxido de carbono. La corriente de gas pasa a un reactor de cambio de alta temperatura donde se incrementa el contenido de hidrógeno. Luego se pasa a una unidad de adsorción donde se produce hidrógeno de alta pureza. El sistema completo es bastante similar a una planta de gasificación de carbón, con excepción de la unidad de preparación



de la biomasa y el diseño del reactor. Debido al bajo poder calorífico por unidad de masa de la biomasa en comparación con el carbón, las instalaciones de procesamiento son mayores que las de una planta de gasificación de carbón de capacidad comparable. (Herguido, Corella, & Gonzalez-Saiz, 1992)

2.2.7.5. Descomposición térmica directa del agua (Termólisis)

El agua puede descomponerse térmicamente a temperaturas por encima de los 2 000 K. El grado de disociación está en función de la temperatura: solo el 1 % a 2 000 K, 8,5 % a 2 500 K y 34 % a 3 000 K. El producto obtenido es una mezcla de gases a temperaturas extremadamente altas. Los problemas principales en este método están relacionados con los materiales requeridos para soportar tan altas temperaturas, la recombinación de los productos de reacción a altas temperaturas y la separación del hidrógeno de la mezcla. (Herguido, Corella, & Gonzalez-Saiz, 1992)

2.2.7.6. Ciclos termoquímicos

La producción de hidrógeno empleando ciclos termoquímicos involucra la descomposición química del agua a temperaturas menores que las requeridas para la termólisis, a través de una serie de reacciones químicas cíclicas que finalmente liberan el hidrógeno. Algunos de los procesos termoquímicos con mayor investigación incluyen: ciclo ácido sulfúrico-yodo, ciclo híbrido de ácido sulfúrico, ciclo híbrido de ácido sulfúrico-bromuro de hidrógeno, ciclo de bromuro de calcio-óxido de hierro (UT-3) y ciclo de hierro-cloro.

Dependiendo de las temperaturas a las cuales el proceso se lleva a cabo, se pueden alcanzar altas eficiencias (40-50 %). Sin embargo, todavía es necesario resolver ciertos problemas para que este método pueda ser práctico.



Problemas relacionados con el movimiento de grandes cantidades de los materiales necesarios para las reacciones químicas, la toxicidad de algunos de los químicos involucrados y la corrosión a altas temperaturas. (Herguido, Corella, & Gonzalez-Saiz, 1992)

2.2.7.7. Producción foto-biológica (Bio-fotólisis)

La producción de hidrógeno mediante bio-fotólisis consiste en la utilización de algas microscópicas, como algunas bacterias (cianobacterias) que son capaces de absorber radiación solar y almacenarla en forma de almidón o glucógeno. Esta energía es liberada posteriormente según las necesidades metabólicas del microorganismo. Asimismo, determinadas especies de estos microorganismos y en determinadas circunstancias, son capaces de generar hidrógeno aun no formando parte de su ciclo vital. La producción de hidrógeno puede propiciarse mediante la adopción de determinadas técnicas de cultivo, incluyendo la manipulación genética. De este modo puede compatibilizarse las funciones propias del microorganismo (alimentación, crecimiento y reproducción), con las de producción de H₂. (Plou, Duran, & Peña, 2014)

2.2.7.8. Costos de producción del hidrógeno

La parte más significativa de la economía del hidrógeno es la producción de un modo sostenible, eficiente y amigable con el medio ambiente. El desafío clave de los diferentes métodos de la producción del hidrógeno a partir de diferentes fuentes es la reducción de costos.

Acorde a los datos estadísticos, entre 40 y 50 millones de toneladas de hidrógeno son producidas cada año. La mayor parte de esta producción viene del reformado de hidrocarburos ligeros o de oxidación de hidrocarburos pesados.



Es notable que la producción de hidrógeno por medio de electrólisis representa una parte muy pequeña de la producción total (4 %). La cantidad de hidrógeno producida por otras tecnologías mencionadas anteriormente puede considerarse despreciable.

Entre todos estos métodos de producción, algunos resultan prácticos para algunas aplicaciones industriales y presentan la ventaja de producir hidrógeno de manera limpia y resolver los problemas medioambientales relacionados con la producción del hidrógeno a partir del reformado de hidrocarburos ligeros y la oxidación de hidrocarburos pesados.

Cabe señalar que la electrólisis se puede considerar como una forma sostenible de producir hidrógeno solo si la electricidad utilizada proviene de fuentes renovables. De manera similar, para que los ciclos termoquímicos puedan ser calificados como formas de producción limpias, el calor requerido debe provenir de fuentes renovables o debe ser calor residual de algún otro proceso industrial.

Como consecuencia, es importante destacar que los aspectos locales juegan un papel importante en el costo final del hidrógeno producido (costos para la importación del equipo necesario, costos locales de energía, entre otros).

Por otra parte, es importante mencionar que la dificultad de comparar diferentes medios de producción se debe a que el producto obtenido puede poseer diferentes características en términos de presión y pureza.

Algunos procesos industriales pueden requerir un hidrógeno muy puro, y no puede provenir directamente de una instalación de reformado con vapor sin pasar por una etapa de purificación.

Por ejemplo, para reducir el tamaño de los tanques en vehículos de hidrógeno, el hidrógeno es almacenado a altas presiones, así que se requiere un compresor para alcanzar



350 o 700 bares. Como consecuencia, la comparación de diferentes medios de producción de hidrógeno requeriría la definición de una unidad funcional común que comprenda no sólo una unidad de masa de hidrógeno (por ejemplo 1 kg), sino también las especificaciones en términos de presión y pureza.

Además de los costos es esencial tener en consideración también la contribución de los procesos de conversión de energía primaria en la emisión de gases de efecto invernadero, esto al final dirige el cambio climático. (Sherif, 2014)

2.2.8. Reactores de celdas electrolizadoras

En un reactor de celdas electrolizadoras, la electricidad provoca la disociación del agua en moléculas de hidrógeno y oxígeno. La corriente eléctrica pasa entre dos electrodos separados por un electrolito, produciendo hidrógeno en el cátodo (electrodo negativo) y oxígeno en el ánodo (electrodo positivo). El H₂ producido es dos veces el volumen del O₂ y puede ser utilizado inmediatamente o almacenado. (International Standard, 2011) Los reactores de celda se clasifican en dos: celda húmeda y celda seca. (Standard, 2011)

2.2.8.1. El reactor de celda húmeda o sumergible

Es un contenedor de plástico o de acrílico lleno de agua con un electrolito, en donde los electrodos (espirales, placas o tubos) de acero inoxidable, cobre o níquel; se encuentran totalmente sumergidos. Al aplicar la corriente eléctrica a los electrodos el gas oxihidrógeno (mezcla de gases de H₂ y O₂) asciende a través del contenedor y escapa por la parte superior. (Bazán Valle, 2016)

2.2.8.2. Reactor de celda seca

Por otra parte el reactor de celdas secas no se sumerge en un recipiente ya que la misma celda es el contenedor. Las celdas secas tienen un número de configuraciones diferentes de las placas que varían de acuerdo a la función configurada, estas placas pueden ser positivas, negativas o neutras (no hay conexión con los electrodos). En la Figura 2 se puede observar un esquema de la instalación de un reactor de celdas secas que hace uso de la energía solar. (Bazán Valle, 2016)

2.2.9. Generador de hidrógeno de celda seca

También es conocido hidrolizador, celda de hidrógeno o como generador de hidrógeno. A este tipo de generador se lo conoce como de celda seca, no porque no contenga agua, si no por el motivo de que la celda es diferente a la celda sumergida en agua. Al igual que el de celda húmeda tienen el mismo funcionamiento, pero en este caso el agua circula por la parte interna de la celda; en la siguiente Fig.4 se puede observar que a su izquierda vemos una celda sumergida en agua en su depósito y sus respectivas conexiones eléctricas y a su derecha se puede observar el de celda seca (fecha azul indica la entrada de agua y la flecha roja la salida gas hidrógeno).

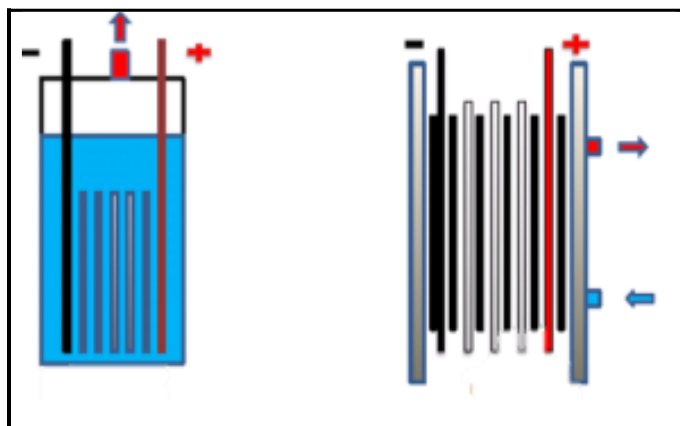


Figura 3. Celda húmeda y celda seca.

Fuente: (H. holgado 2012)

En la industria automotriz se está tratando de implementar este tipo de dispositivo para mejorar el rendimiento de los motores de combustión interna a gasolina como los de diésel.

2.2.10. Funcionamiento

Para operar el generador utiliza básicamente agua destilada y una corriente de 12V DC ya sea de una batería o de una fuente rectificada; a través del proceso de la electrolisis (separación de átomos), el dispositivo entrega por separado el oxígeno y el hidrógeno, siendo enviado el gas hidrógeno a la entrada de aire del motor donde se va a combinar con la mezcla estequiometria y posteriormente a combustionar. En la Fig. 5 se muestra el funcionamiento de un generador de celda seca detallando sus partes y su forma de operar.

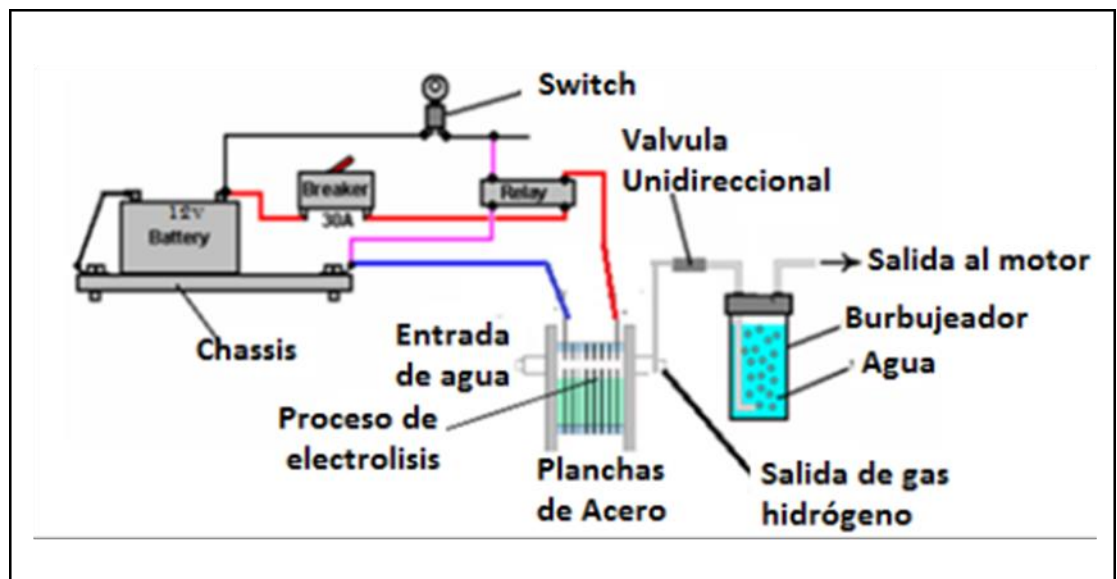


Figura 4. *Proceso de generación de gas hidrógeno*

Fuente: (<http://reyhidrogeno.blogspot.com/2009/02/para-que-jijos-sirve-el-gas-hidroxi.htm>, s.f.)



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

El presente trabajo de investigación se ejecutó en la planta de curtiembre de la facultad de Ingeniería Química que se encuentra ubicada en el parque industrial salcedo, manzana L2, AV. Estudiante, frente a la escuela de la policía.

Ubicación:

- Departamento : PUNO
- Provincial : PUNO
- Distrito : PUNO
- Altitud : 3,820 m.s.n.m.
- Temperatura : 13 – 22 °C
- Precipitación : 800 mm/año

3.2. MATERIALES

3.2.1. Equipo

Equipo de Hidrogeno diseño propio sin marca con 99 placas

3.2.2. Materiales

- Tomacorrientes (3 m de longitud, capacidad 20 amperios)
- Estabilizador de voltaje 220 V y 15 amperios
- Cables adicionales (número 12, rojo y negro 1.5 m por 3 electrodos)

3.2.3. Reactivos

Hidróxido de sodio (soda caustica), pureza (%) 99



3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.3.1. Diseñar y construir una celda seca

3.3.1.1. Diseño de un generador de hidrogeno por electrolisis del tipo celda seca

Nuestro generador tiene la forma de un sándwich. Con dos placas de compresión con espesor superior del resto y entre ellas se encuentran las placas positivas negativas y las neutras separas cada una de ellas con juntas de goma.

Las placas de compresión son de mismo material de acero AISI 306 que las placas intermedias solo de mayor espesor, los electrodos utilizados, son chapas de un material conductor de la electricidad.

Los mejores materiales es el platino, molibdeno e iridio; sin embargo, estos materiales unidos entre serian la aleación perfecta para una producción eficiente, pero el problema con estas aleaciones resulta ser inconveniente debido a su elevado precio. El aluminio está por debajo en lo que se refiere a costos con el acero inoxidable. El acero inoxidable AISI 306 es el material más económico y con características químicas suficientes para soportar las condiciones alcalinas.

Las juntas de goma aislante del reactor, se encuentran entre los electrodos y tienen la función de evitar el contacto entre los electrodos. El espesor del aislante dependerá de la distancia que se requiera. Que normalmente son alrededor de 2 y 7 mm.

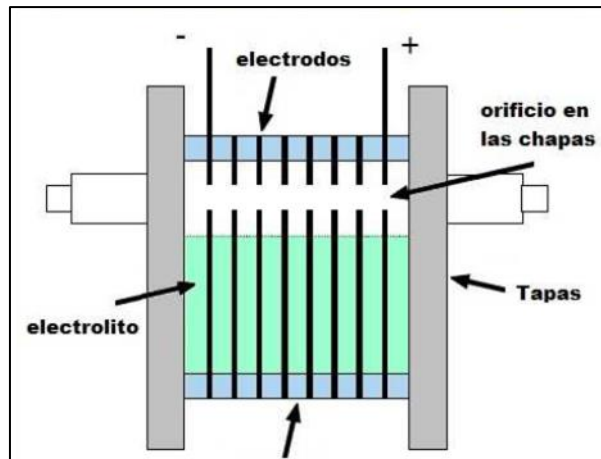


Figura 5.Partes de una celda seca

Fuente: (Holgado, 2012)

El reactor se compone de distintas partes. Más adelante se especificarán las partes que lo componen al cual diseñaremos. En este apartado especificaremos todos los elementos, formas, tamaños y materiales.

La primera pieza del reactor son las placas de compresión que dan la forma final del reactor. Estas placas metálicas de forma cuadrada se componen de la misma calidad que la mayoría de las placas de la celda, con la diferencia de tener un mayor espesor, alta resistencia a la torsión y compresión para un ensamblaje de la forma de sándwich. Hay muchos materiales que pueden ser utilizados para este fin. Pero en este caso se hará de acero inoxidable AISI 306 ya que con este material se puede ajustar la compresión final del reactor sin temor a que se fracture. Estos componentes tienen la forma cuadrada de 160x160 mm y un espesor de 2.5 mm. A continuación, se procederá a perforar observándose en el siguiente esquema divididas entre sí.

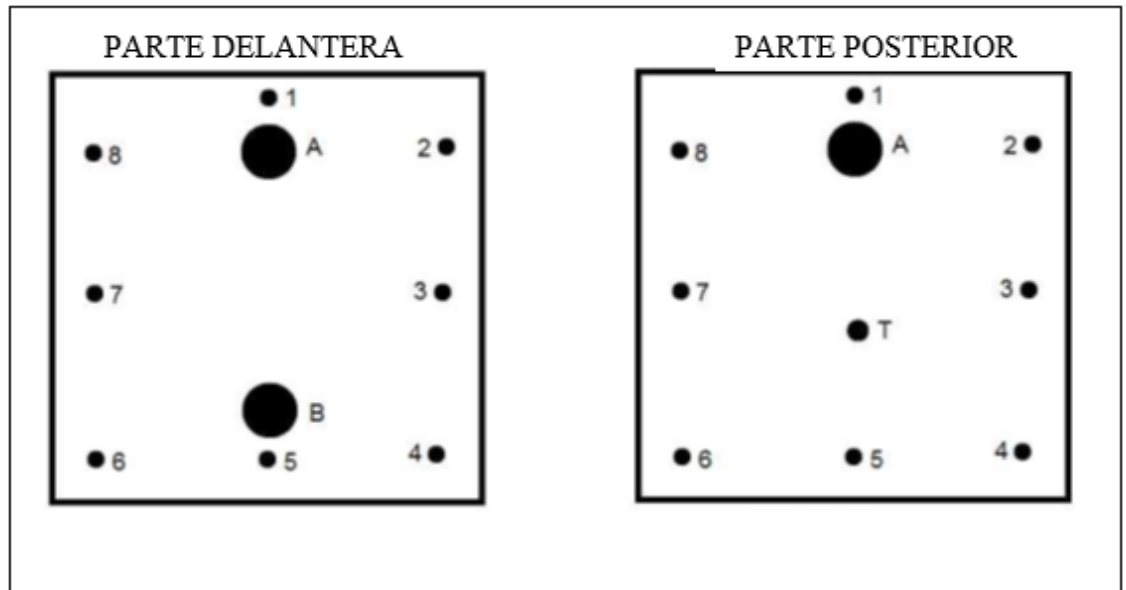


Figura 6. Placas de compresión

Fuente: Elaboración propia

En los agujeros 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, presentes en las dos piezas separadas entre los agujeros frontales de 135 mm. Con 8 mm de diámetro, que posteriormente servirán para el armado y la compresión final del reactor.

El agujero A de ambas placas con diámetro de 8 mm nos servirá para ponerlos tubos de salida del gas propuesto (hidrogeno), el agujero B es para el suministro del agua y electrolito. Y en este caso la placa trasera de compresión con el agujero B tiene la doble función. De llenado y vaciado de la solución alcalina, siendo ambos orificios acompañados de una llave paso.

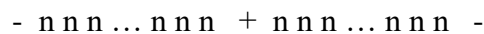
La perforación de estas placas selladoras, la haremos con un taladro de precisión con una broca de 8 mm. El siguiente componente del reactor son los electrodos formados de una plancha de acero inoxidable.

Como se ha mencionado anteriormente, los electrodos pueden ser de diferentes materiales. Siendo aleaciones de metales resistentes a la corrosión y aleaciones de metales



valiosos. El aluminio funciona; sin embargo, el electrolito termina consumándolo formando un compuesto básico. Y emitiendo hidrogeno sin conexión eléctrica. Otro material a utilizar, es el acero inoxidable, como sabe no es tan caro como las aleaciones fuertes dando buenos resultados.

El orden de los electrodos será de un electrodo positivo en el centro del reactor y dos negativos en los extremos, siendo separados por cuarentainueve electrodos neutros. Siendo la configuración de la siguiente forma:



la posición de los electrodos será dos negativos y centrado el positivo, dándose así la cinética de formación de hidrogeno en el electrodo negativo y el oxígeno en el electrodo positivo, generalmente se producirá más cantidad de hidrogeno, y al estar la salida en ambos extremos de la misma aporta la facilidad de salida de este gas.

El uso de los electrodos neutros tiene gran importancia en la reducción de la diferencia de potencial entre los distintos electrodos de la celda seca sobre todo en un reactor que estamos trabajando a alta potencia. Si en caso se pusiese dos electrodos, positivo y uno negativo, la diferencia de potencial seria catastrófica si se aplicase los 198 V, la diferencia de potencial seria 198.

Dejando en claro esta mención de dos placas, por esta razón es importante la adición de las placas neutras. A mayor número de placas los saltos de tensión serán cada vez bajos. la rectificación de corriente con el diodo puente de 50 amperios llegando así de los 198 V. y dividiendo por la diferencia de potencial 4 V obteniéndose el numero de 49 placas por lado sumando en total 99, dos placas 2 negativas y 1 positiva con 50 saltos

a 3.7 V de diferencia de potencial entre cada electrodo, en consecuencia, una mayor probabilidad de formación de hidrogeno, el cual a su vez reduce la diferencia de potencial.

Los electrodos serán de acero inoxidable AISI 306, con las medidas 130 x 130 mm, por 0.5 mm de espesor con una forma de octogonal como se observa en el esquema. Los tres electrodos tienen formas distintas.

En el reactor también se tiene dos electrodos neutros que solo tienen agujero en la parte inferior para evitar la mezcla de los gases. Y obtenerlos por separados.

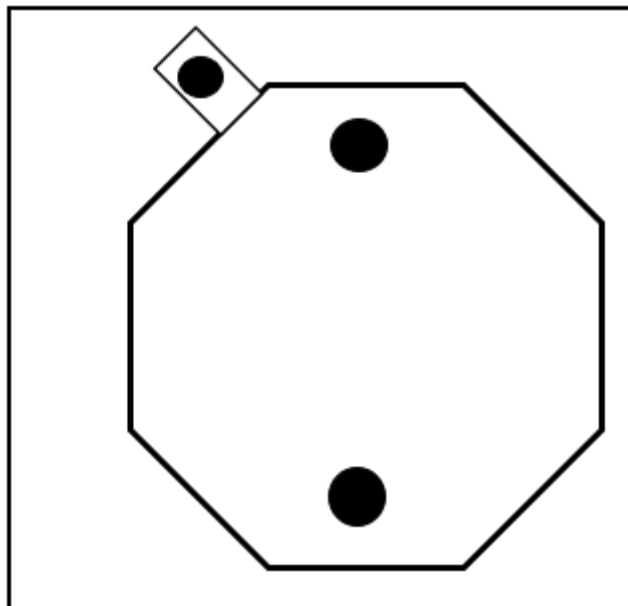


Figura 7. *Electrodo de conexión*

Fuente: Elaboración propia

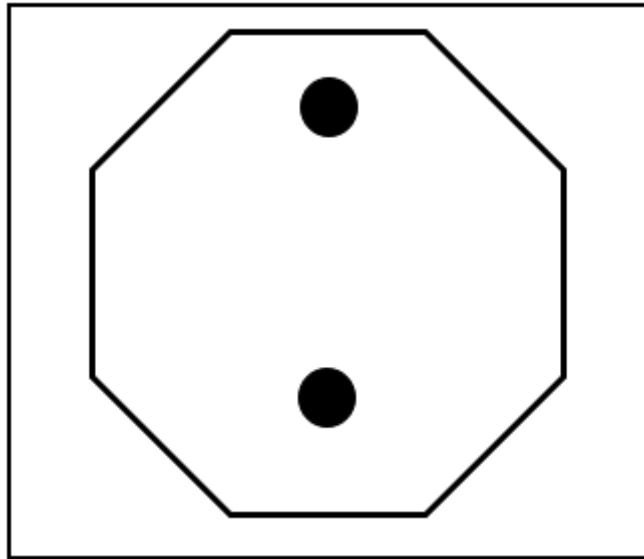


Figura 8. *Electrodo separador de gas*

Fuente: Elaboración propia

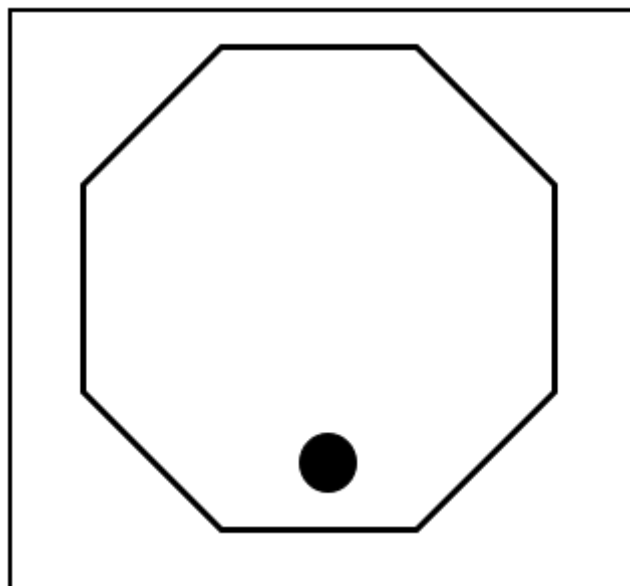


Figura 9. *Electrodo separador de gas*

Fuente: Elaboración propia

Como ya hemos mencionado la configuración de los electrodos, 1 positivo, y 2 negativos y 96 neutros. Los electrodos positivo y 2 negativos tienen la misma forma que los neutros con una diferencia de tener una pestaña en el lateral superior que servirá para las conexiones eléctricas.

Las juntas de goma que separas los electrodos entre sí. Mencionado anteriormente, dicha distancia inicial es de 3.5 mm y comprimido el reactor se tiene 3 mm de separación para el salto de voltaje entre placas. Las juntas deben ser de un material altamente aislante para así evitar el sobrecalentamiento del reactor. Estas juntas son resistentes al ataque químico y soportan temperaturas de operación de hasta 180 °C.

Para el armado del reactor se necesitan un total de 100 gomas aislantes de los cuales 97 son aislantes de 3.5 mm de espesor, una goma de 10 mm de espesor para su ubicación en el centro del reactor y dos en forma octogonal ubicados en los extremos del reactor. Con el fin de evitar la conductividad eléctrica entre las placas de sellado.

Los tres tipos de juntas tienen distintas formas entre sí para su ubicación en el generador, las juntas octogonales tienen la forma y medida de un electrodo neutro con los agujeros A y B.

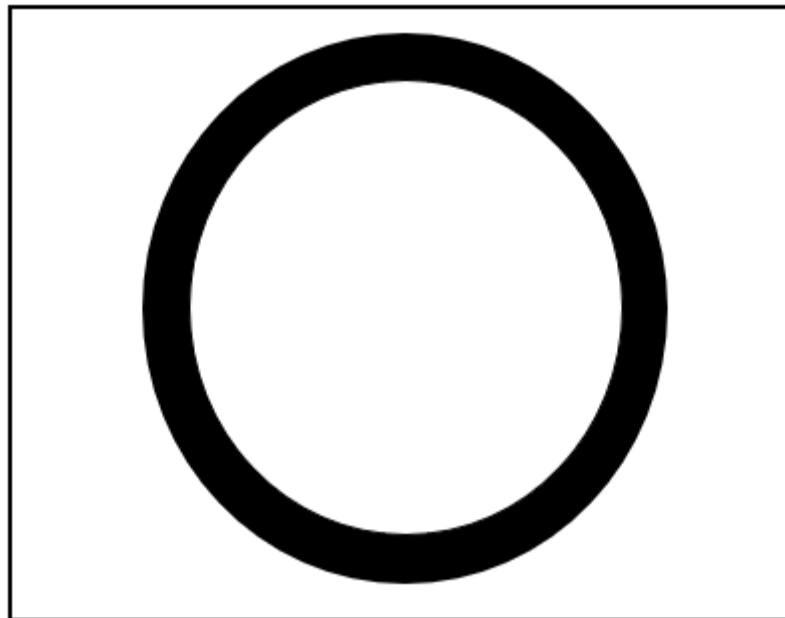


Figura 10. *Juntas*

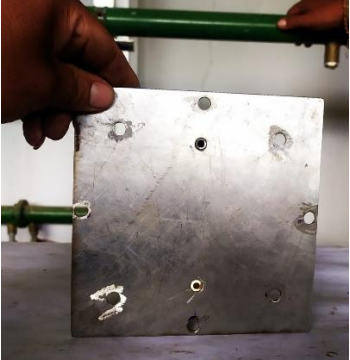
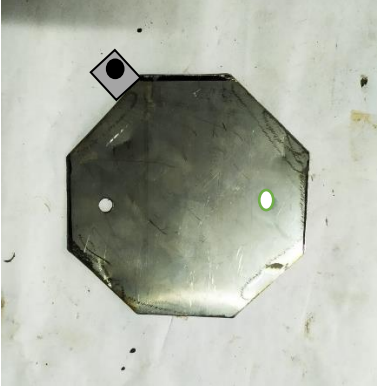
Fuente: Elaboración propia

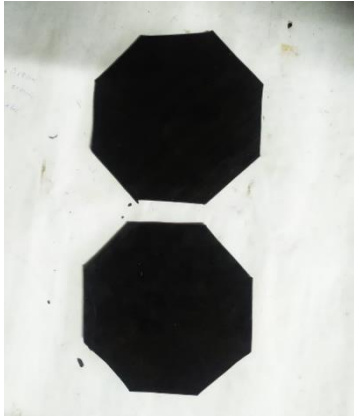


Otro componente del reactor, son los pernos de acero con acabado de zinc, estos a su vez deben ser aislados de los electrodos. La única forma de hacerlo aislante será de cubrirlo con tubo termo retráctil. En total son necesarios 8 pernos con tuercas. Estos pernos de 350 mm de largo y 5 mm de diámetro, para hacer las conexiones eléctricas son necesarios tres tornillos con acabados en zinc 5 mm de diámetro y 10 mm de largo. Posteriormente especificaremos los componentes que integran el reactor.






3.3.1.2. Componentes del reactor

Tabla 2

Componentes del reactor

COMPONENTES DEL REACTOR			
Nombre	Características	cantidad	imagen
Placa lateral	Placa de acero inoxidable AISI 306 160X160 mm Espesor: 2.5 mm	2	
Electrodo de conexión	Acero inoxidable AISI 306 130x130 mm Espesor: 0.5 mm	3	

Junta aislante de compresión	Goma 130 mm x 130 mm x 3.5 mm	2	
Juntas	Goma circunferencia Ø ext 130 mm Ø int 110 mm Espesor 3.5 mm	100	
Junta de oxigeno	Goma circunferencia Ø ext 130 mm Ø int 110 mm Espesor 10 mm	1	

Tubería	Acero y latón Ø 8 mm	4	
Pernos	Acero cincado Ø 5 mm Longitud 350 mm	8	
Tuercas	Acero cincado Ø int 5 mm	16	
Teflón	Cinta teflón rolo	2	
Tubo termo Retractil	Ø 8 mm Longitud 1m	3	

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3. Diseño del sistema

Para aprovechar el hidrogeno producido, se necesitan de ciertos elementos que permitan el buen funcionamiento del sistema, hacer que el gas salga correctamente del reactor sin presentar fugas o peligros de explosión.

En el siguiente esquema se presenta el diagrama de flujo del sistema de la formación del hidrogeno.

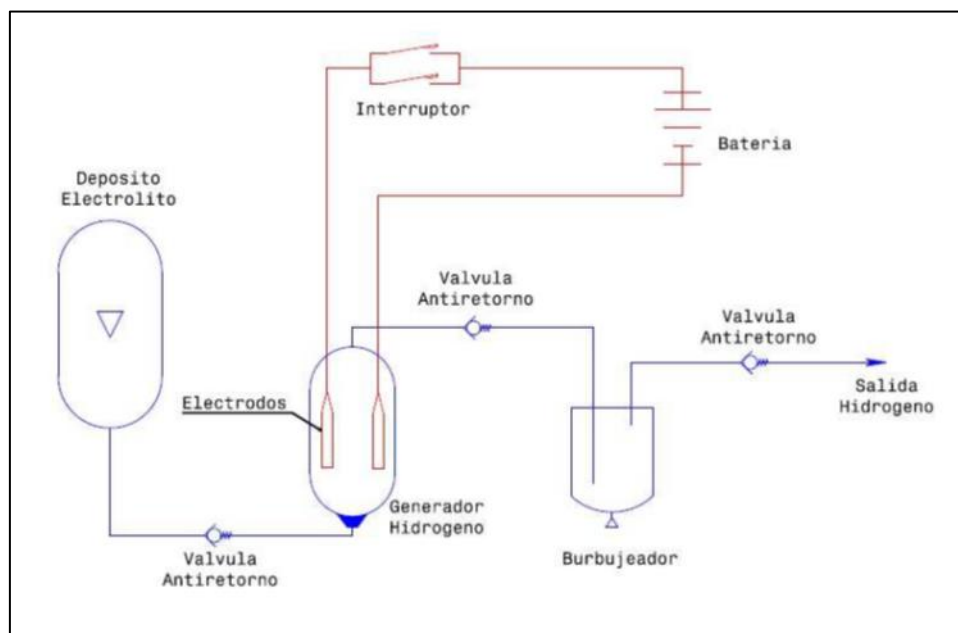


Figura 11. *Diagrama de flujo del sistema de la formación del hidrogeno*

Fuente: (Holgado, 2012)

En el diagrama se observa dos fluidos:

- Primero, fluido de color rojo representa el circuito eléctrico, que permite el paso de la corriente eléctrica y la tensión dando así a funcionar el generador.
- Segundo, representada de color verde oscuro como la entrada del electrolito, y representado con azul la salida de gas hidrogeno, por último, se presenta al oxigeno con una coloración verde.



Circuito de gas

Este circuito está representado principalmente por el hidrogeno.

Así como en los apartados anteriores explicamos. Siendo un generador de celda seca el cual tiene limitado la cantidad de suministro electrolítico. Cuando el generador se pone en marcha, el hidrogeno y oxigeno comienza su formación a partir del agua que contiene el electrolito, dado que el agua reduce su volumen en bajas proporciones. No es necesario que un depósito electrolítico bombee o circule la solución. Porque el reactor tiene una autonomía no superior a 20 minutos. Y que a su vez un bombeo automático proporciona un aumento en el coste eléctrico.

Todos estos componentes están unidos por un circuito de tuberías, codos y conectores que transportan la salida de hidrogeno y la entrada de electrolito.

Para este caso usaremos mangueras flexibles de nylon con 9 mm de diámetro interno para observar si el reactor tiene un excedente de electrolito viéndose con una salida de espumas densas.

Elementos de seguridad

En caso del circuito eléctrico se ha incorporado un diferencial magneto térmica y un fusible. Ambos de 10 amperios máximo las cuales limitan el paso excesivo de la corriente eléctrica. Así evitar el sobrecalentamiento del reactor y una posible explosión de la misma. Otro elemento de seguridad que se incorpora en el sistema de generación de hidrogeno es el burbujeador viéndose, así como el principal elemento de seguridad ya este evita el retorno de la flama a la celda y evitar una explosión violenta del reactor.

Otra de las funciones que tiene el burbujeador. Es de retener las impurezas vistas en forma de espumas, ya que contiene agua destilada y al ser burbujeadado el gas producido. También nos evita que el hidrogeno producido no contenga vapor de agua.

El burbujeador es un recipiente cerrado donde entra el gas hidrogeno producido. Tiene dos orificios, la tubería de entrada es más larga a la otra debido que debe sumergirse hasta casi llegar a la base del recipiente. La tubería de salida se ubica en la parte superior del recipiente para recolectar el gas proveniente en forma de burbuja de la parte inferior como a continuación se especifica los elementos del sistema.

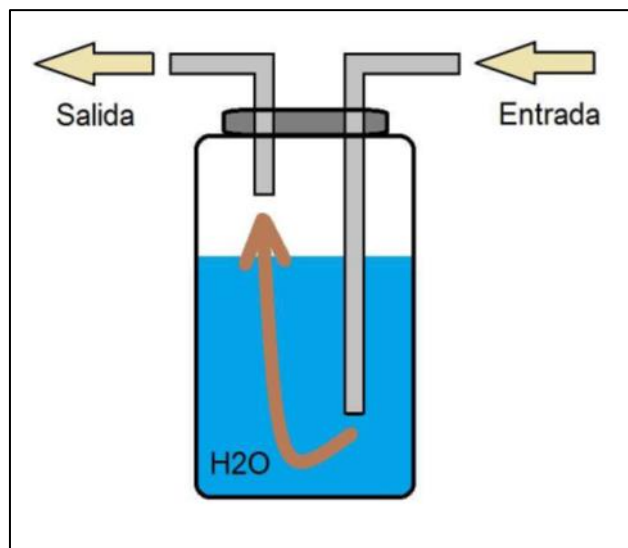


Figura 12. Burbujeador

Fuente: (Holgado, 2012)

3.3.1.4. Construcción del reactor

En este apartado realizaremos el montaje del reactor, así como los componentes que integran en el sistema.

Como se muestra en la imagen del reactor diseñado. De esta manera se observa el integran en el sistema del montaje.

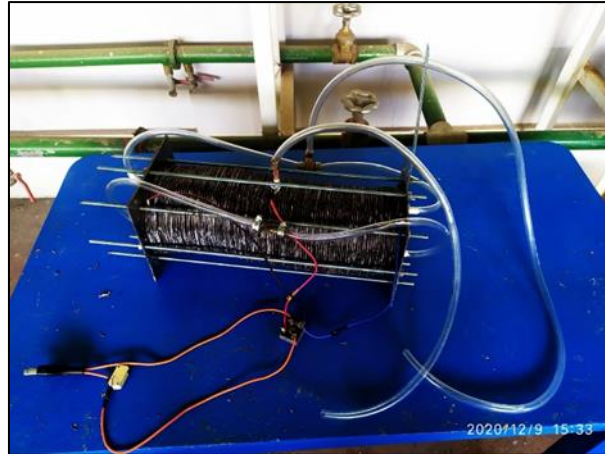


Figura 13. *Presentación del equipo*

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el proceso de construcción, acompañado de imágenes tomadas durante el proceso. El primer componente en ser construido es la placa de compresión de acero inoxidable de 160 mm x 160 mm x 2.5 mm a continuación se observa las perforaciones.



Figura 14. *Placa de compresión*

Fuente: Elaboración propia

Los electrodos neutros inicialmente se recortan en forma cuadrada de su forma comercial 2.4 m x 1.20 m y 0.5 mm de espesor. Seguidamente se procede a recortar en forma cuadra de 130 mm



Figura 15.*Electrodos neutros*

Fuente: elaboración propia

Posteriormente a las placas se procede a recortar en forma octogonal, al mismo tiempo apilar hasta de 15 unidades para su perforación de los agujeros de entrada del electrolito y salida del gas A y B respectivamente.



Figura 16. *Recorte y perforación de placas en forma octogonal*

Fuente: Elaboración propia

Los electrodos de conexión eléctrica, así como las 2 placas separadoras de los gases oxígeno e hidrogeno son recortadas como las neutras tomando la siguiente forma

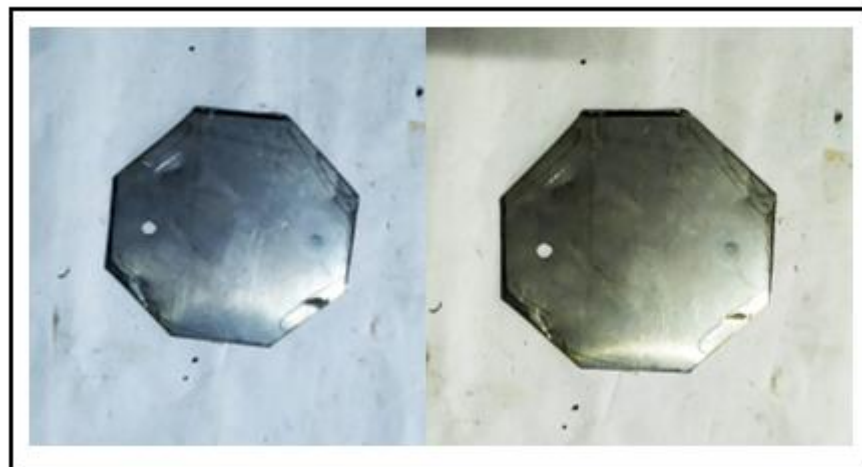


Figura 17. *lectrodo de conexión*

Fuente: Elaboración propia

Las juntas aislantes están hechas de una plancha de goma 100 mm x 100 mm x 3.5 mm, recortadas en medidas de 135 mm x 135 mm posteriormente recortadas en forma de anillo como la siguiente imagen.



Figura 18: *Juntas aislante de electrodos*

Fuente: Elaboración propia

Las gomas aislantes de los extremos se componen del mismo material y toman la siguiente.

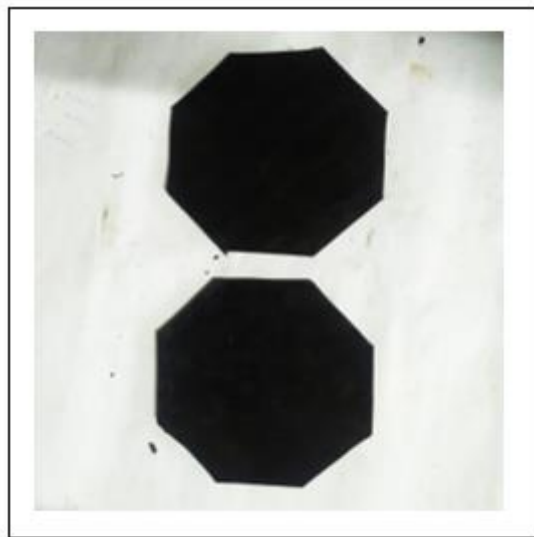


Figura 19. *Goma aislante de las tapas*

Fuente: Elaboración propia



Figura 20. *Preparación de componentes*

Fuente: Elaboración propia.

Ya terminado la preparación de los componentes, se procede a realizar el montaje del reactor empezando por la placa de compresión con las tuberías de salida.

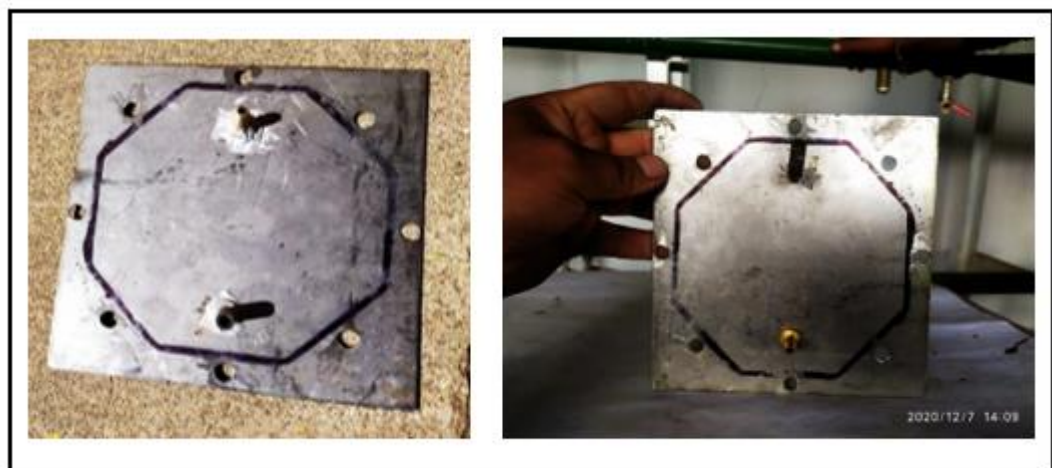


Figura 21. *Montaje del reactor*

Fuente: Elaboración propia.

Como se explicó en los apartados anteriores, entre la placa de sellado o de compresión y el primer electrodo de conexión negativa pondremos la junta octogonal que permitirá el bloqueo del paso eléctrico, luego iremos armando los electrodos neutros y las

gomas en forma de anillo uno encima del otro, con la presencia de silicona de alta temperatura y un sellado hermético, hasta llegar al electrodo 28 separador de los gases hidrogeno y oxígeno, seguidamente se vuelve a apilar los electrodos neutros y la goma hasta llegar al electrodo 49.



Figura 22. Colocación de juntas

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se llega a colocar la junta de 10 mm de espesor en el electrodo 49 seguido por el segundo electrodo de conexión positiva, se prosigue con el ensamble hasta llegar al segundo electrodo separador de gases que es el electrodo 72 del reactor, se continua con el ensamble hasta llegar al último electrodo de conexión negativa, seguidamente se coloca la goma aislante octogonal para finalmente colocar la placa de sellado. Todo este proceso se lleva cabo añadiendo silicona de alta temperatura en cada una de las piezas. Este ensamble se lleva sin la presencia de los tornillos.

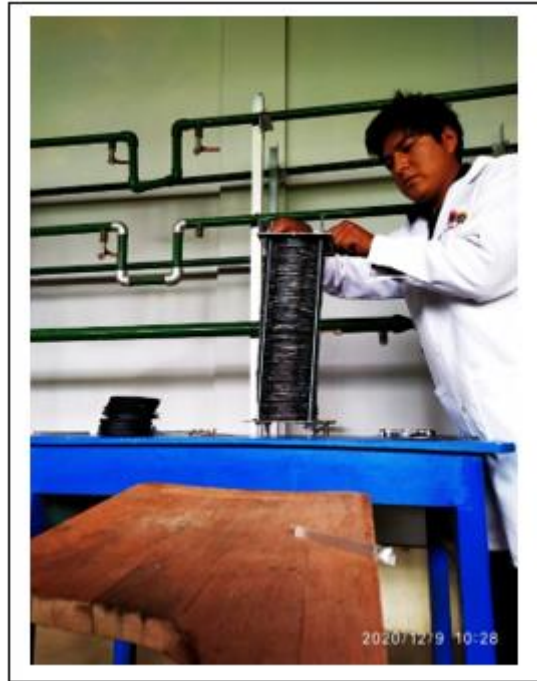


Figura 23. *Ajuste del reactor*

Fuente. Elaboración propia

Finalmente se ajusta los 8 pernos que sellan herméticamente el reactor, tal como se aprecia en la imagen.

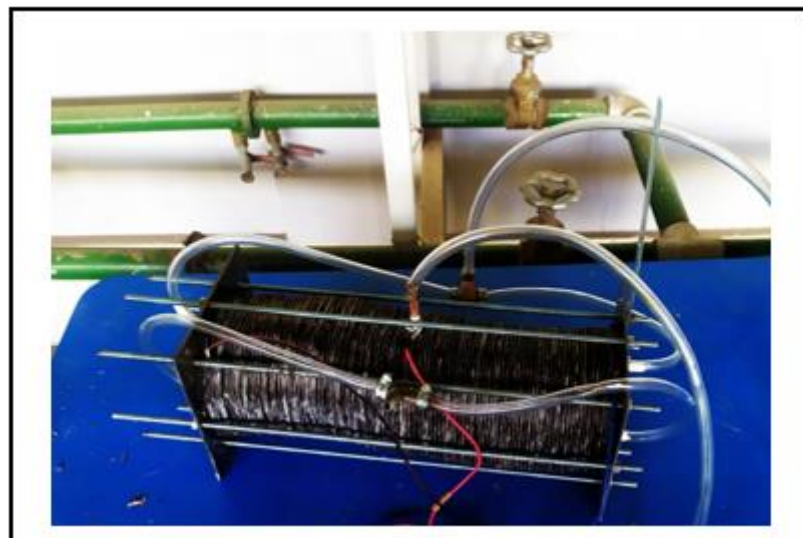


Figura 24. *Ajuste de pernos*

Fuente: Elaboración propia



3.3.1.5. Prueba experimental

Realizaremos múltiples pruebas, pero con una fuente de alimentación de 220 voltios y un corriente regulado de 9 a 16 amperios la misma por la cantidad de electrolito suministrado.

El electrolito que usaremos es una solución de hidróxido de sodio (NaOH) conocido en el comercio como sosa caustica. Realizaremos pruebas experimentales desde 0.9 hasta 2 % en peso de NaOH.

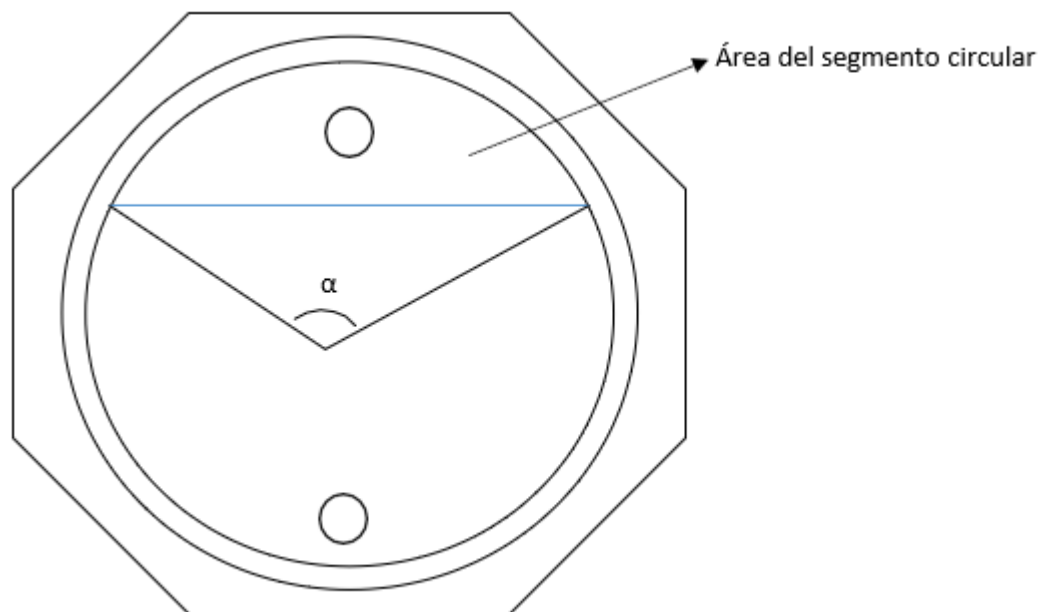
El reactor anteriormente mencionado tiene una configuración de electrodos de uno positivo ubicado en el centro de la misma, dos negativos, uno a cada lado del reactor y 96 electrodos neutros entre el positivo y negativo (- n n n... n + n...n n n -). Las pruebas se realizarán con esta configuración de electrodos, pero también se estipulan con configuraciones distintas de solo dos electrodos, positivo y negativo en ambos extremos del reactor. A la que aparentemente se confiaría una producción sin diseños complicados. El problema para esta configuración con parámetros semejantes a lo propuesto es que la diferencia de potencial y el salto de electrones entre electrodos es más lenta y en consecuencia ralentiza la cinética de formación de hidrogeno.

3.3.1.6. Cálculo de volúmenes en la celda



Figura 25. Electrodo separador de gases y el vacío entre celdas

Fuente: elaboración propia



Con el teorema de Pitágoras se procede el cálculo del volumen del segmento circular considerando 0.5 cm hacia abajo desde el conducto superior y así formado un triángulo.



Hallamos α

$$a^2 = b^2 + c^2 -$$

$$2bc \cos A$$

$$b^2 = a^2 + c^2 -$$

$$2bc \cos B$$

$$c^2 = a^2 + b^2 -$$

$$2bc \cos C$$

$$b^2 = a^2 + c^2 -$$

$$2bc \cos a$$

Despejando

$$b^2 = \frac{a^2 + c^2}{1} + \cos b$$

$$x = \frac{b^2 - a^2 - c^2}{2ac} = \cos B$$

Aplicando la inversa de COS para despejar b

$$\cos^{-1} \left(\frac{b^2 - a^2 - c^2}{-2x5.5x5.5} = \cos^{-1} \cos B \right)$$

$$\cos^{-1} \left(\frac{8.2^2 - 5.5^2 - 5.5^2}{-2x5.5x5.5} \right) = B$$

$$B = 96$$

$$\alpha = 96$$



Con los datos de α se calcula finalmente el área del segmento circular

A=AREA DEL SECTOR CIRCULAR- AREA DE LA

S.C CIRCUNFERENCIA

ANGULAR

$$A.S.C = \frac{\pi r^2 \alpha}{2} - \frac{r \times r}{2}$$

$$\frac{\pi 5.5^2 \alpha}{360} - \frac{5.5 \times 5.5}{2}$$

$$A.S.C = 10.217 \text{ cm}^2$$

Volumen del segmento circular

$$v.s.c = A.S.C \times h$$

$$v.s.c = A.S.C \times h$$

$$v.s.c = 10.217 \text{ cm}^2 \times 0.30 \text{ cm}$$

$$v.s.c = 3.0651 \text{ cm}^3$$

Cálculo del volumen interno de la celda

Área de placa sin el segmento circular

Área de placa total

$$A = \pi r^2$$

$$A = 5.5^2 = 95 \text{ cm}^2$$



Área neta del contacto electrolítico

$$AL = Ai - (Asc + Aducto)$$

$$AL = 95 - (10.21 + 0.502)$$

$$AL = 84.3 \text{ cm}^2$$

Volumen total del ducto inferior

$$VA = \pi r^2 \times h$$

$$VA = \pi 0.4^2 \times 0.3$$

$$VA = 2.5132 \text{ cm}^3$$

Volumen total del prototipo

$$Vt = AL \times h + (Vd) \quad h = 34.7 \text{ cm (celda)}$$

$$Vt = (843 \times 34.7) + 2.5132$$

$$Vt = 2927.7232 \text{ cm}^3$$

Sin embargo, el volumen experimental que se consideró para reducir el rebalse del electrolito por la parte superior se toma un volumen de 2.200 ml de selección de electrolito.

3.3.2. Determinar los parámetros óptimos en la generación de hidrogeno, como: tensión, corriente y temperatura por el modelo matemático.

3.3.2.1. Desarrollo del modelo matemático por experimentación y estadística

- Diseño factorial 2k

Para definir el modelo matemático para la optimización de la formación de hidrogeno, se ha utilizado es el programa Statgraphics Centurión XVI, técnica estadística



que permite planificar eficientemente la experimentación de modo que con un determinado número de ensayos se logre determinar la significancia de cada una de las variables independientes evaluadas, el efecto de sus interacciones, obteniéndose un modelo matemático empírico, que constituye la base para un proceso posterior de optimización.

$$N = 2^k$$

Siendo:

N = Número total de experimentos

k = Número de variables

En nuestro caso, como hemos mencionado, se realiza un experimento que depende de tres factores y se plantea dos niveles, por lo que se requerirán:

Número de experimentos: $N=2^k = 2^3 = 8$ experimentos

- Identificación de las variables de trabajo

En el presente trabajo de investigación se ha efectuado la optimización eficaz del proceso, encontrando los rangos de trabajo más óptimos de dicho proceso, se trabajó en función a los factores y niveles establecidos anteriormente de la siguiente tabla:



Tabla 3

Variables de datos del diseño experimental

SIMBOLO	NOMBRE DE LAS VARIABLES	UNIDAD	X mín. (-)	X máx. (+)
X ₁	Catalizador	Gramos	19,8	44
X ₂	Amperaje	Amperios	11	16
X ₃	Temperatura	°C	16	70

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4

Variables para el diseño experimental

Nº	X ₁	X ₂	X ₃	Y
1	19,8	11	16	6,57015
2	44	11	16	7,84514
3	19,8	16	16	7,94514
4	44	16	16	9,22013
5	19,8	11	70	8,59514
6	44	11	70	9,87013
7	19,8	16	70	9,97013
8	44	16	70	12,2451

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. cálculo de la concentración del catalizador

NaOH comercial



1. [] 1%-----100ml

%-----2200ml

[]= 22g NaOH

2. [] 1.1%-----100ml

%-----2200ml

4. [] 1.2 %-----100ml

%-----2200ml

[]= 26.4g NaOH

5. [] 1.3 %-----100ml

%-----2200 ml

[]= 28.3 g NaOH

6. [] 1.4 %-----100ml

%-----2200ml

[]= 30.8 g NaOH

7. [] 1.5 %-----100ml

%-----2200ml

[]= 33 g NaOH

3. [] 0.9 %-----100ml

%-----2200 ml

[]= 28.3 g NaOH

Valor óptimo

8. [] 1.6 %-----100ml

%-----2200ml

[]= 35.2 g NaOH

Valores de maximo

9. [] 2 %-----100ml

%-----2200ml

[]= 44 g NaOH

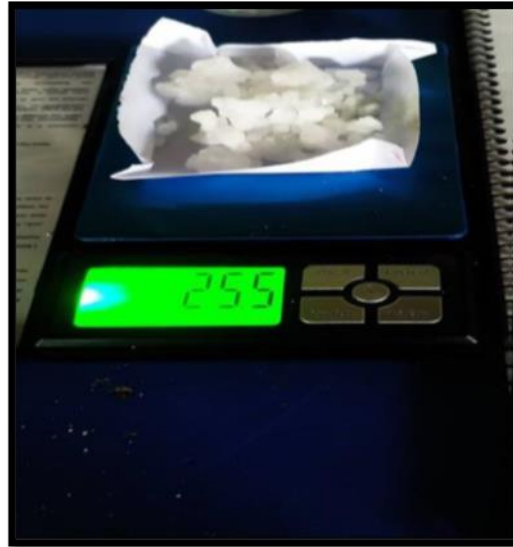


Figura 26. *Peso del catalizador*

3.3.4. Determinar el volumen de producción del hidrogeno mediante el proceso experimental.

El desarrollo de la cinética de formación de hidrogeno se dará aplicando la concentración del electrolito, voltaje y amperaje vs el tiempo promedio para cada concentración, así como se ve en la figura 31

La cinética de formación de hidrogeno es directamente proporcional a la concentración del electrolito en el reactor.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Diseñar y construir una celda seca.

Se diseño el equipo para generar el hidrogeno este equipo consta de 99 placas.

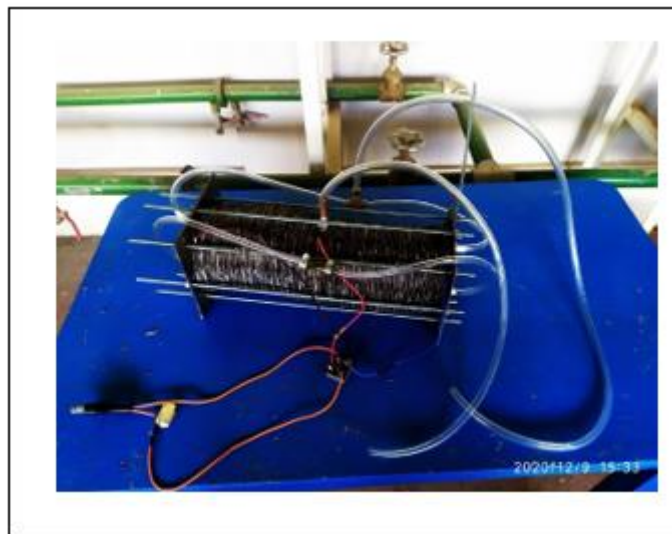


Figura 27. *Equipo de generador de hidrogeno*

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Determinar los parámetros óptimos en la generación de hidrogeno, como: tensión, corriente y temperatura.

4.1.2.1. Tratamiento estadístico del diseño factorial

Este diseño factorial resume los resultados del ajuste a un modelo estadístico relacionando Capacidad de adsorbente de los factores experimentales. La tabla ANOVA particiona la variabilidad de la capacidad de adsorción de Pb entre los valores de respuesta observados en varias componentes.

Tabla 5*Efectos estimados para Y*

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	9,03263	0,124998	
A: CATALIZADOR	1,52498	0,249995	1,0
B: AMPERAJE	1,62499	0,249995	1,0
C: TEMPERATURA	2,27499	0,249995	1,0

Fuente: Estimación de respuesta por programa STATGRAPHICS

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1,0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1.

4.1.2.2. Análisis de varianza para Y

Tabla 6*Análisis de Varianza para Y*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: CATALIZADOR (g)	4,65116	1	4,65116	37,21	0,0037
B: CORRIENTE (A)	5,28115	1	5,28115	42,25	0,0029
C: TEMPERATURA (°C)	10,3511	1	10,3511	82,81	0,0008
Error total	0,49998	4	0,124995		
Total (corr.)	20,7834	7			

Fuente: Estimación de ANOVA por programa STATGRAPHICS

R-cuadrada = 97,5943 %



R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95,7901%

Error estándar del est. = 0,353546

Error absoluto medio = 0,187496

Estadístico Durbin-Watson = 1,625 (P=0,2099)

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Y en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 97,5943% de la variabilidad en Y. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 95,7901%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,353546. El error medio absoluto (MAE) de 0,187496 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

4.1.2.3. Estimación de efectos y modelo matemático

Tabla 7*Coeficientes de regresión para Y*

Coeficiente	Estimado
constante	0,823403
A: CATALIZADOR (g)	0,0630159
B: CORRIENTE (A)	0,324997
C: TEMPERATURA (°C)	0,0421294

Fuente: Estimación de coeficientes por el programa STATGRAPHICS

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Y=0,823403+0,0630159*\text{CATALIZADOR}+0,324997*\text{AMPERAJE}+0,0421294*\text{TEMPERATURA}$$

Tabla 8*Camino de Máximo Ascenso para Y*

			<i>Predicción para</i>
CATALIZADOR	CORRIENTE	TEMPERATURA	Y
(g)	(A)	(°C)	(%)
31,9	13,5	43,0	9,03263
32,9	13,7202	46,3288	9,30744
33,9	13,9403	49,6577	9,58225
34,9	14,1605	52,9865	9,85706
35,9	14,3806	56,3153	10,1319
36,9	14,6008	59,6441	10,4067

Fuente: Estimación de coeficientes por el programa STATGRAPHICS

Esta ventana despliega el trayecto de máximo ascenso (o descenso). Este es el trayecto, desde el centro de la región experimental actual, a través del cual la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio menor en los factores experimentales.

Indica buenas características para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo es incrementar o decrementar Y.

4.1.2.4. Optimización de respuesta

Meta: maximizar Y

Valor óptimo = 11,7451

Tabla 9

Optimizar Respuesta

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
CATALIZADOR (g)	19,8	44,0	44,0
CORRIENTE (A)	11,0	16,0	16,0
TEMPERATURA (°C)	16,0	70,0	70,0

Fuente: Estimación de coeficientes por el programa STATGRAPHICS

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Y sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

4.1.2.5. Diagrama de Pareto

La grafica de diagrama de Pareto estandarizada muestra los valores estimados en orden decreciente de importancia, en dicha que la temperatura es la variable de mayor importancia.

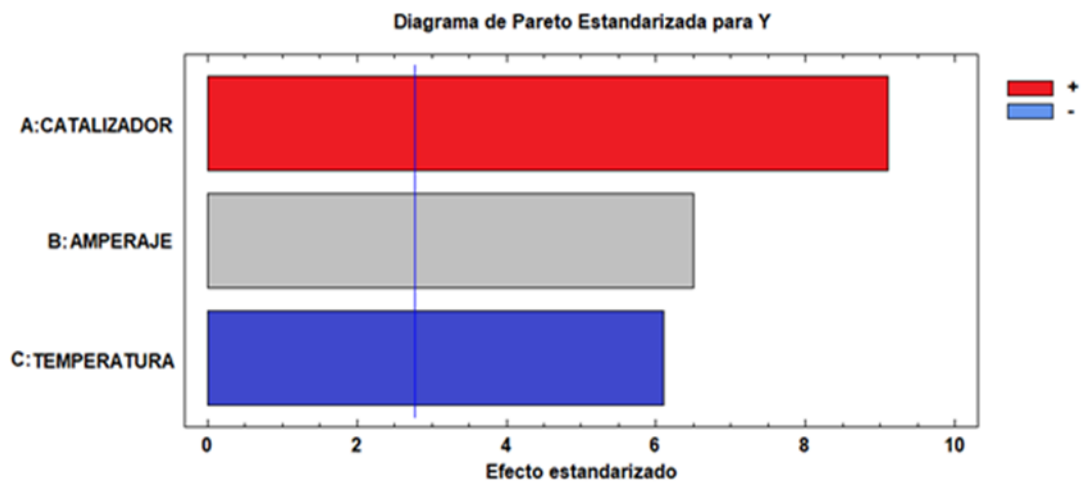


Figura 28. *Diagrama de Pareto*

Fuente. Elaboración propia

La figura muestra el diagrama de Pareto que es una representación gráfica del análisis de varianza, en él se describe los factores más influyentes en su respectivo orden sobre la cinética de formación de hidrogeno mediante el proceso de electrolisis del agua en una celda seca.

Los efectos del color rojo (amperaje) son directamente proporcionales a la variable respuesta (cantidad de H), mientras que los de color plomo y azul son inversamente proporcionales. El diagrama incluye una línea vertical cuya ubicación depende de intervalo de confianza determinado (97 %). todo efecto sobrepase la línea será de considerable significancia para el proceso. Del diagrama se observa claramente que el amperaje es la variable de mayor influencia, seguido de las cuadraturas de la temperatura y catalizador.

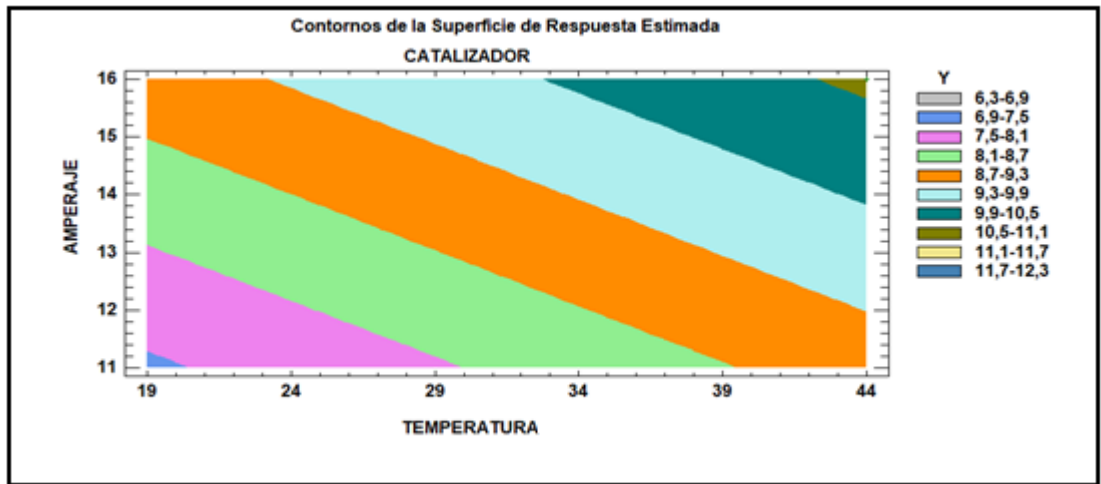


Figura 29. Contornos de superficie de la respuesta estimada

Fuente: Estimación de coeficientes por el programa STATGRAPHICS.

Visualizando el gráfico (apolíneas), figura 2, podemos interpretar lo siguiente: El valor óptimo para el amperaje es de 11 amperios, para el catalizador es 19,8 g y para la temperatura es 43 °C.

Esta ventana muestra la ruta ascendente. Este es el camino del centro de la región experimental actual a lo largo de la cual la respuesta estimada varía rápidamente con una variación mínima en los factores experimentales. Indica localizaciones buenas para ejecutar experimentos adicionales si su objetivo es aumentar o disminuir el Rendimiento.

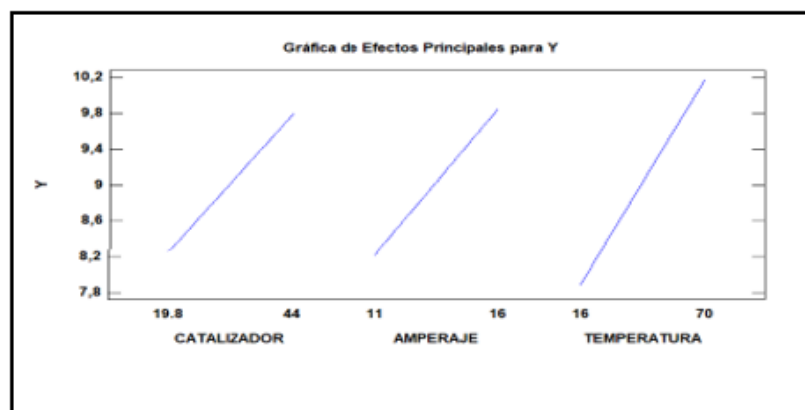


Figura 30. Interacción para rendimiento

Fuente: Estimación de coeficientes por el programa STATGRAPHICS.



En la figura 30, se puede visualizar que no existe interacción entre la combinación de las variables, por lo que estas variables son independientes lo que corresponde a la superficie respuesta.

4.1.3. Optimizar el uso del catalizador (NaOH) en la celda seca.

El punto de partida de uso del catalizador se sintetizo mediante las referencias bibliográficas y por tratarse por un prototipo dado que se utiliza la alta tensión de operación asumiendo 19.8 g según la figura 30.

4.1.4. Determinar el volumen de producción del hidrogeno mediante el proceso experimental.

Tabla 10

resultados experimentales

producción L/ min	Concentración (%)
9.6	1
10	1.1
9	0.9
10.6	1.2
11.2	1.3
12.5	1.4
13.6	1.5
14.2	1.6
16	2

Fuente: elaboración propia

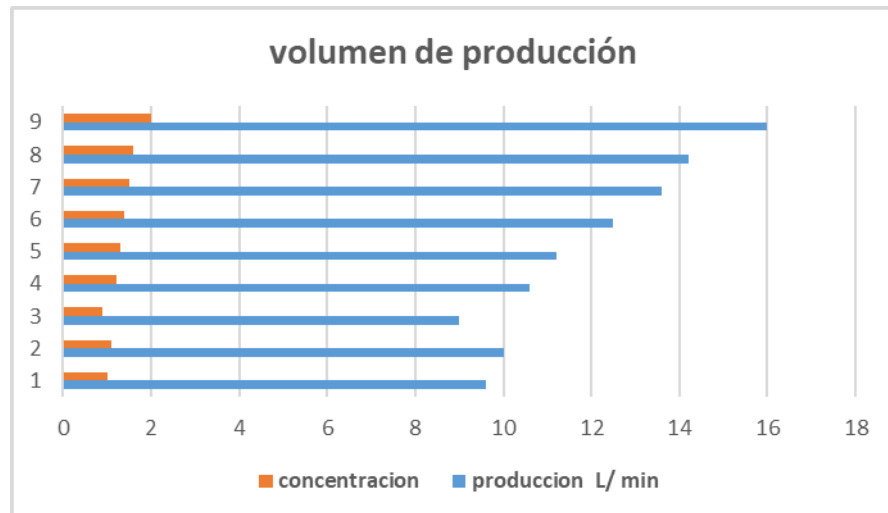


Figura 31. *Volumen de producción vs concentración*

Fuente: elaboración propia

Hallamos número de moles de H_2 producido

$$n_{H_2} = 1 \text{ mol } 22.4 \text{ L } X \rightarrow 9 \text{ L/ min}$$

$$n_{H_2} = 0,4018 \text{ mol/ min}$$

Para el O_2

$$n_{O_2} = 1 \text{ mol } \rightarrow 22.4 \text{ L}$$

$$X = 4, 5 \text{ L}$$

$$n_{O_2} = 0, 2008 \text{ mol / min}$$

$$n_t = 0, 4018 + 0, 2008 = 0, 6026 \text{ mol}$$

Hallamos masa de los gases H_2 y O_2

$$m = n \times PM$$

$$m_{H_2} = 0,4018 \text{ mol} \times \frac{2g}{\text{mol}} = 0,8035 \text{ g}$$

$$m_{O_2} = 0,2008 \text{ mol} \times \frac{16g}{\text{mol}} = 3,2142g$$



$$mt = 0,8035 + 3,2142 = 4,0177g$$

$$F = C + (A + B)$$

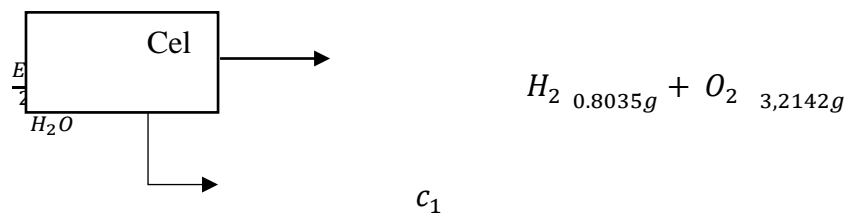
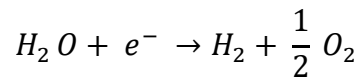
$$2200g = C + (0,8035 + 3,2142)$$

$$C_1 = 2200 - 4,0178$$

$$C_1 = 2195.9822g$$

$C_1 = 2195.9822$ ml de H_2O queda en el reactor cada minutos

Ecuación cinética



$$F = C + (A + B)$$

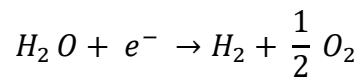
$$2200g = C + (0,8035 + 3,2142)$$

$$C_1 = 2200 - 4,0178$$

$$C_1 = 2195.9822g$$

$C_1 = 2195.9822$ ml de H_2O queda en el reactor cada minutos

Ecuación cinética



$$V = K [A]^2$$

$$K = A^{-(Ea/RT)}$$



Tabla 11

Resultados cinéticos

Tiempo (min)	H_2O (ml)	H_2 (l)	O_2 (l)
0	2200	0	0
1	2195,9	9	4,5
5	2179,9	45	22,5
10	2159,98	90	45

Fuente: elaboración propia

Ecuación de la velocidad de reacción

$$V = -\frac{\Delta [H_2O]}{\Delta t} = \Delta \frac{[H_2]}{\Delta t} = \frac{1}{1/2} \frac{\Delta [O_2]}{\Delta t}$$

Velocidad de desaparición de H_2O en el intervalo de 1 min

$$V = -\frac{\Delta [H_2O]}{\Delta t} = -\frac{(2195,9 - 2200)}{1\text{min}} = 4,1 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$$

Velocidad de formación de H_2

$$V = \frac{\Delta [H_2]}{\Delta t} = \frac{9 - 0}{1\text{min}} = 9 \text{ l/min}$$

Velocidad de formación de O_2

$$V = \frac{1}{1/2} * \frac{\Delta [O_2]}{\Delta t} = \frac{1}{\frac{1}{2}} * \frac{4,5 - 0}{1\text{min}} = \frac{1}{\frac{1}{2}} * 4,5 \text{ l/min}$$

Tabla 12

concentración del catalizador con respecto al tiempo

	Concentración (%)	Tiempo (min)
Temperatura 43 °C	1	4
	1.1	3.1
	0.9	4.6
	1.2	3.7
	1.3	3.3
	1.4	2.8
	1.5	2.1
	1.6	1.6

Fuente: elaboración propia

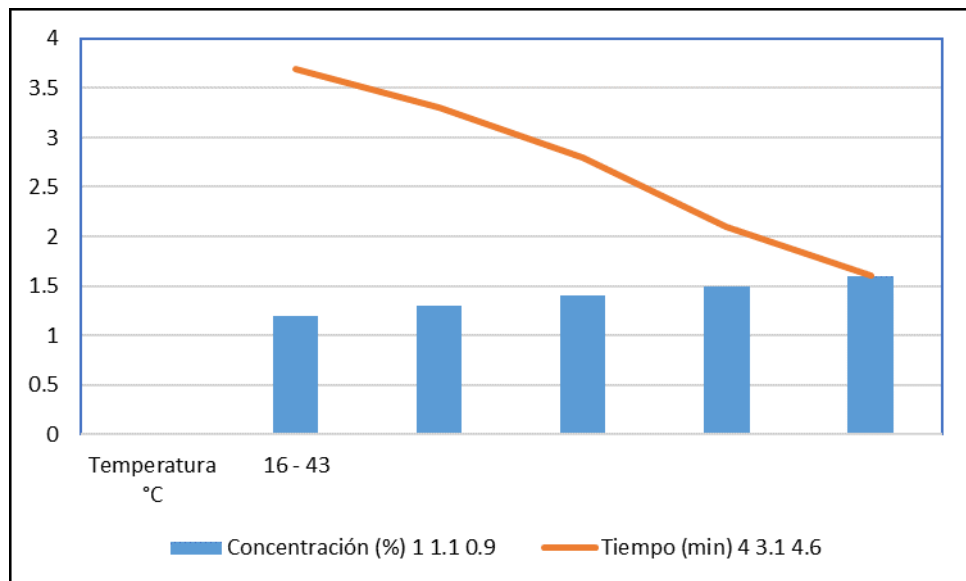


Figura 32. *Concentración y tiempo*

Fuente: Elaboración propia

La cinética de formación de hidrogeno es directamente proporcional a la concentración del electrolito en el reactor. Como se observa en la figura, el punto de partida de la temperatura es de 16 y llegando a 43 como temperatura intermedia para



70°C. A mayor concentración del electrolito menor es el tiempo en llegar a la temperatura intermedia.

Con esta tabla deduciremos la autonomía del reactor en función a la cinética de formación del gas viendo así la concentración más baja 0.9% de electrolito, como estable para el buen funcionamiento del generador.

4.2. DISCUSIÓN

Según (Holgado, 2012) Diseñó su equipo de generador de Hidrogeno por electrolisis con 11 placas de geometría pentagonal, 2 negativas, 1 positiva y 8 neutros. Con material de acero inoxidable AISI 316 L con medidas de 230x230 mm y 1.5 mm de espesor, y 3 mm de junta de aislamiento entre electrodos; sin embargo, no calculo el volumen interno de la celda.

para el ensamblaje final utilizo 2 placas de metacrilato con 250 x250 mm y de 10 mm de espesor. Al respecto en nuestro generador de diseño con 99 placas octogonales 2 negativos 1 positiva y 49 neutros obteniéndose un volumen interno calculado de 2927 ml tomando 2200 ml por seguridad de rebalse del electrolito.

Se optimizo los parámetros como la tension con un diodo rectificador tipo puente a 198 V constante, la corriente se optimizo de acuerdo al porcentaje del catalizador. A mayor peso del catalizador mayor corriente consumirá la celda y por consiguiente la producción de hidrogeno subirá significativamente. En la figura 33 se aprecia la importancia del catalizador, la temperatura se optimizo con la figura 33 en los antecedentes como. (Barrientos, K. Y., & Bernabé, S. J. 2013). (Holgado, 2012) y (Beltrán & romero, 2017). Utilizaron voltímetros con medidas regulables en la salida de tensión y corriente.



La optimización del catalizador se sintetizó con el programa de estadística. Empezando con la adición que proponen (Holgado, 2012). Se preparó el catalizador en concertaje de peso llegando al resultado de 0.9 % como valor óptimo después de realizar varios ensayos.

En la determinación del volumen de producción de hidrógeno. Según (Holgado, 2012). El caudal de producción de hidrógeno, aplico la diferencia de volumen. Cuando el gas producido ocupe el volumen del agua en un recipiente de 2 litros. Cabe mencionar en este punto que el intercambio de volumen genera presión en la celda y un retardo en el cronómetro. Llegando así a 0.483 ml/min. Por consiguiente, lo que planteamos en nuestro generador fue cortar la base de un envase conectado en la parte superior la entrada del gas. De tal manera no genera presión en la medición tal como se observa en la figura 28. Llegando así al resultado óptimo de 9 l/min datos experimentales para la comprobación con la ecuación cinética. Tal como se menciona que la velocidad de reacción del agua se da gracias a la adición del catalizador. En la producción de hidrógeno, desgaste del agua y producción de oxígeno respectivamente.



V. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó una celda seca a partir de una plancha de acero inoxidable AISI 304, para ser cortadas en forma octogonal, separadas entre sí por una goma en su ensamblado pudiéndose utilizar en total 99 placas, 49 neutras, 2 negativas y 1 positiva. Con 84.3 cm cuadrados del área neta de contacto y así calculando su volumen interno y su volumen del segmento circular y con un generador de 2200 ml de capacidad de agua y electrolito. Este diseño proporciona mayor capacidad de producción en comparación con la celda húmeda.
- Se determinó los parámetros óptimos como la tensión, se rectificó con un diodo puente rectificador. Obteniéndose así una tensión en la celda de 220 AC a 198V de DC, reduciendo así la misma entre las 99 con una diferencia de potencial entre los electrodos inferiores a 4 voltios.
- El corriente suministrado a la celda es directamente proporcional a la producción del hidrogeno tal como lo menciona las leyes de Michael Faraday. Para llegar a la corriente óptima para la producción del gas se comenzó experimentalmente con 10 hasta 16 amperes. Llegando a la conclusión de usar 11 amperios como la medida más óptima, así evitar su recalentamiento e incrementando su autonomía. De 10 minutos.
- Se preparó las soluciones alcalinas de sosa caustica empezando desde 1% hasta 2% en peso. Llegando a la conclusión de bajar la concentración a 0.9% en peso para la producción optima del hidrogeno. Siendo este la concentración que minimiza o maximiza y regulador del paso de la corriente eléctrica.
- Se concluye el volumen de formación de hidrogeno en una celda seca por electrolisis se debe a la concentración del electrolito, seguido por la corriente, voltaje y temperatura en conjunto optimizados dan los resultados de los 9 litros



por minuto en un tiempo de operación de la celda en 10 minutos. Finalmente, la concentración de 0.9% de electrolito óptimo para la cinética de formación del gas.



VI. RECOMENDACIONES

- Para el buen desempeño de la celda se recomienda usar aceros inoxidable AISI 304 y 316Ti estos materiales permiten una mayor resistencia al desgaste y corrosión por la solución alcalina.
- Para el buen rendimiento el diseño y recorte de las placas deben ser calculadas el área neta de contacto, la forma geométrica el espacio sobrante de la placa que sirva como disipador de calor, el espesor de la placa el diámetro de los agujeros que interconectan la celda.
- Se debe tener conocimiento en materia electrónica para así implementar en función a su capacidad y confiabilidad, manipular siempre tomando los elementos de seguridad.
- En la preparación del electrolito se recomienda pesar una cantidad inferior a lo propuesto y pesar correctamente, diluir con la medida exacta de agua destilada para así evitar sobrecalentamiento y evitar eventos catastróficos.
- Para poner en marcha el reactor tener en cuenta que las llaves de entrada del electrolito estén cerradas siendo el hidrógeno un gas altamente ligero.
- Para determinar la cinética de formación de hidrógeno se recomienda tener amplio conocimiento en física, química para construir y poner en funcionamiento tratándose de un ensayo con gases altamente inflamables.

Recomiendo a los egresados de la Facultad de Ingeniería Química plantearse en mejorar este trabajo de investigación, optimizar la funcionalidad de una celda seca y llevar el espíritu investigador a niveles internacionales por el bien de nuestra república.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMT-Solar. (2012). *The Energy Innovations Company*. Obtenido de The Energy Innovations Company: <http://www.amt-solar.com/index.php/es/hidrogeno/que-es-el-hidrogeno>.
- Barboza. (2013). *combustibles de origen petrofósiles*.
- Barrientos, K. Y., & Bernabé, S. J. ((2013)). *PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS ALCALINA UTILIZANDO ELECTROCATALIZADORES DE ALEACIONES TERNARIAS*. Huancayo -Perú.
- Genovese, J. (2009). *Hydrogen production cost estimate using water electrolysis*. Colorado.
- Godula, J. (2014). *Detlef. Hydrogen production by electrolysis*. Germany: Agata and STOLTEN.
- Gollei. (2014). *MEASURING AND OPTIMISATION OF*.
- (s.f.). *H. holgado 2012*.
- Herguido, J., Corella, J., & Gonzalez-Saiz, J. (1992). *Ind. Eng. Chem*.
- Holgado, h. (2012). *Summary of Electrolytic Hydrogen Production, milestone completion report*.
- <http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0613t.pdf>. (s.f.).
- <http://rehydrogeno.blogspot.com/2009/02/para-que-jijos-sirve-el-gas-hidroxi.htm>.
- (s.f.).
- <http://riunet.upv.es/handle/10251/16804>. (s.f.).



- Isaac, H. C. (2012). Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de Hidrógeno a partir de electrólisis alcalina del agua. 1-78.
- Joshi, N. (2015). *produccion hidrogeno con el fin de usarlo en la generación de energía eléctrica.*
- Julke, F. M., Yáñez, J. E., & González, M. S. (2013). *Evaluación de diferentes aceros para la KOH.*
- LENNTECH. (2013). *Water Threament Solutions.* Obtenido de Water Threament Solutions: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/h.htm>.
- Madridejos, A. J. (2007). *Producción de hidrógeno por reformado de etanol con vapor empleando catalizadores de Cu – Ni soportados.* España.
- Pelaéz, E. (2001). Nuevos materiales para el desprendimiento de hidrógeno. *ed. Arreglada*, 2-6.
- Reyes, D. (2018). análisis de un generador de hidrogeno de una celda seca para su aplicación en motores de combustión interna.
- Rivera, E. F. (2015). *CELDA SECA ELECTROLÍTICA PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO.* Ecuador.
- Romero, E. M., & Gualan, D. F. (2014). *implementaron un generador de hidrogeno de celda seca en un vehículo Chevrolet Streem 1,6 L.*
- Sanz Villuendas, R. (2010). *Estudio tecnológico sobre el vector de hidrógeno y sus aplicaciones en el siglo XXI.* Zaragoza.: Universidad de Zaragoza.
- Sherif, S. (2014). *Handbook of hydrogen energy.* 1a ed. CRC Press.



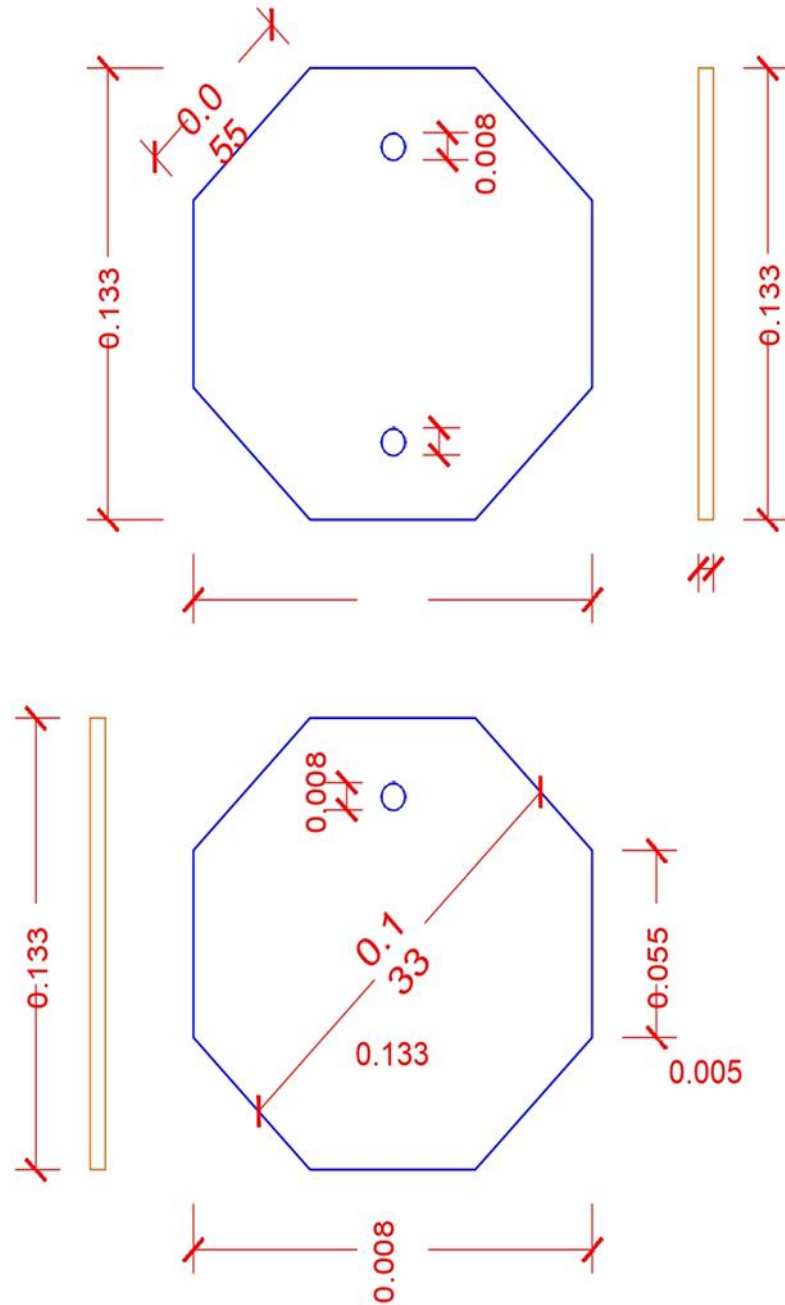
- Sopandi, A. W.-A. (2015). *estudiaron el efecto del espesor del electrodo en la producción de HHO (Hidrogeno Hidrogeno Oxigeno) en una celda humeda usando al NaHCO₃ (bicarbonato de sodio) como catalizador.*
- Sudrajat, S. H. ((2018)). *diseño un generador hibrido de hidrogeno multipistas de una ceda húmeda y celda seca.*
- Velasquez, & Quinceno. (2013). *diseño de un sistema de generación de hidrogeno por electrolisis utilizando una celda de combustible de membrana de intercambio protónico que fue diseñado y construido en la Universidad Tecnológica de Pereira.*



ANEXOS



ELECTRODO NEUTRO - SEPARADOR

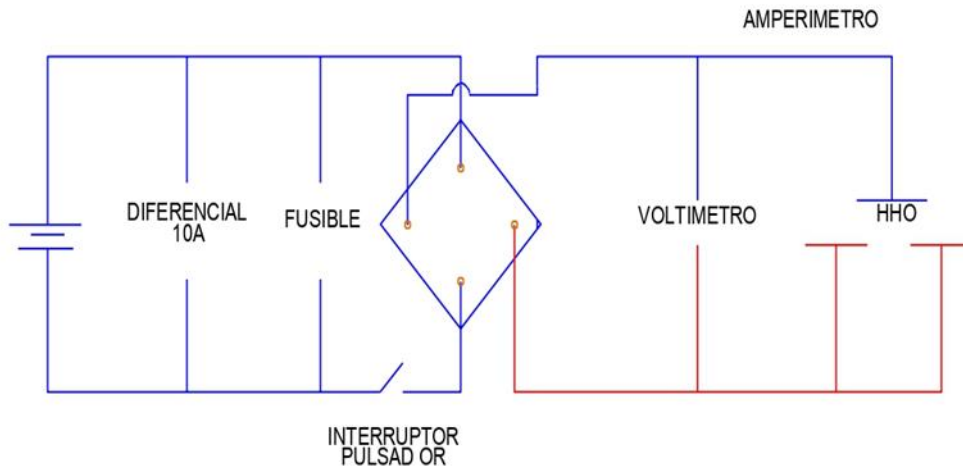


UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS :	CINETICA DE FORMACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTROLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA SECA	AÑO :	2021
AUTOR:	Arturo Quisbert Mamani	PLANO :	01



ESQUEMA ELÉCTRICO

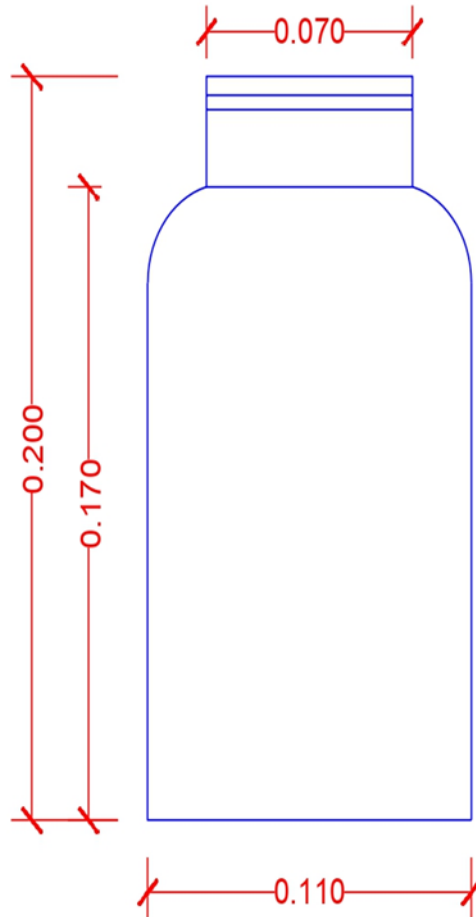


UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

TESIS :	CINETICA DE FORMACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTROLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA SECA	AÑO :	2021
AUTOR:	Arturo Quisbert Mamani	PLANO :	02



DEPÓSITO ELECTROLITICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

TESIS : CINETICA DE FORMACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE EL
PROCESO DE ELECTROLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA SECA

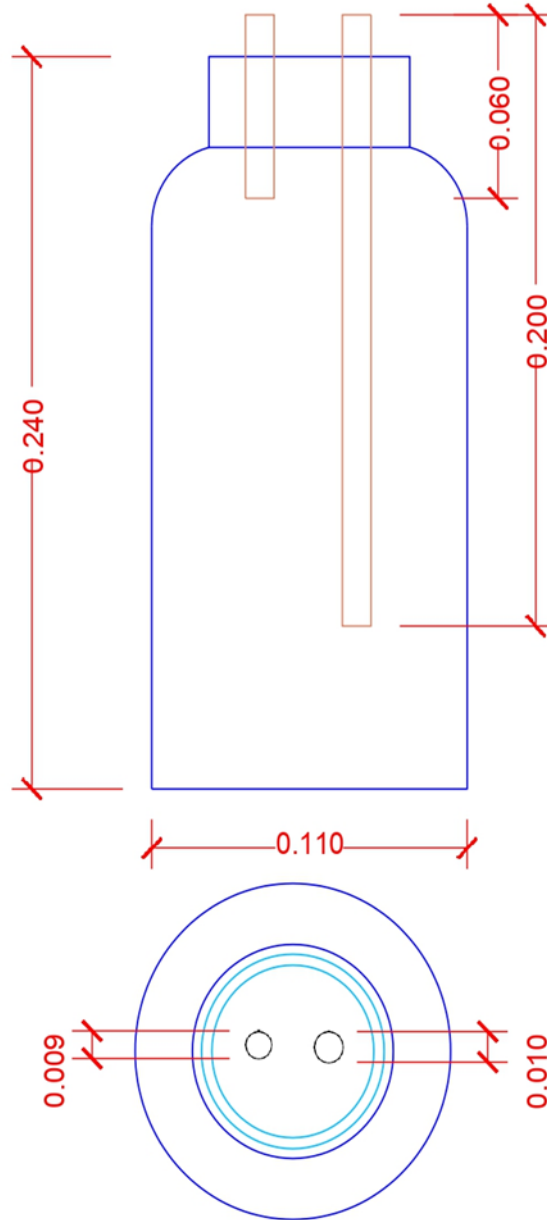
AÑO : 2021

AUTOR: Arturo Quisbert Mamani

PLANO : 03



BURBUJEADOR

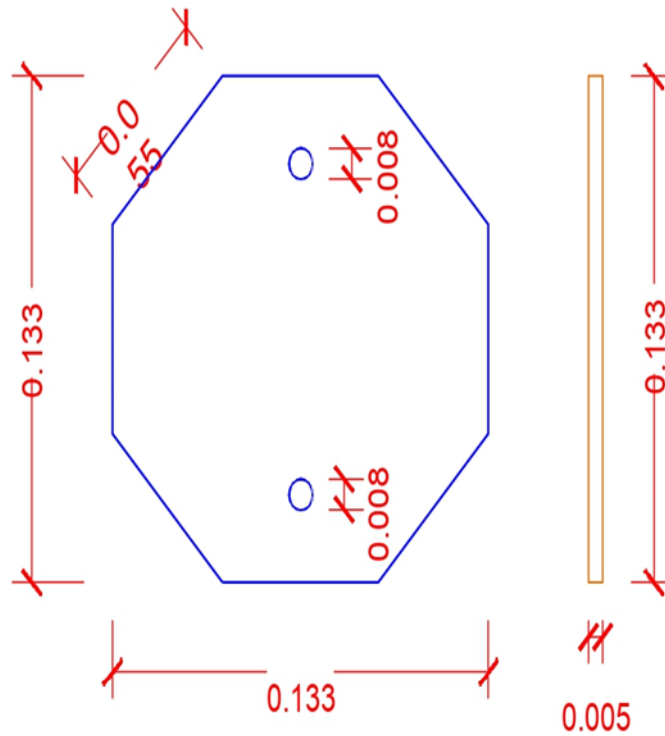


UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

TESIS :	CINETICA DE FORMACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTROLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA SECA	AÑO :	2021
AUTOR:	Arturo Quisbert Mamani	PLANO :	04



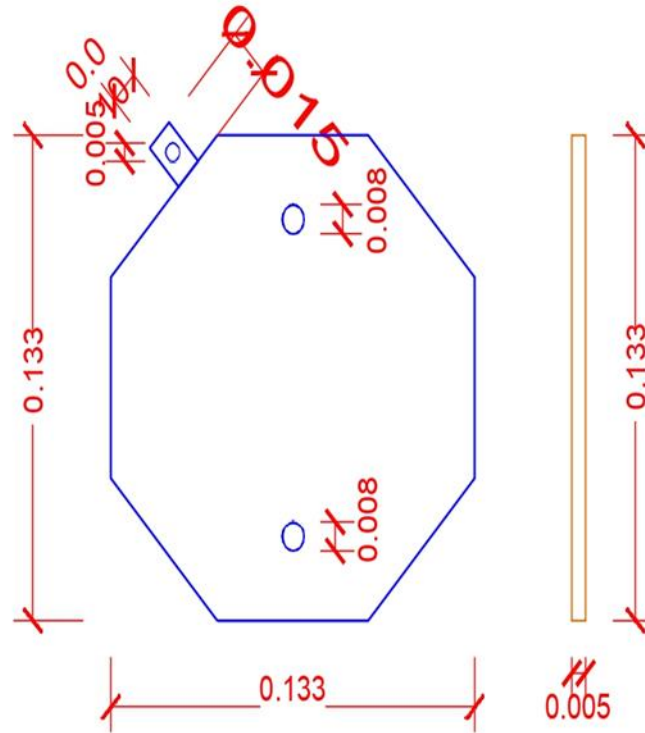
JUNTA AISLANTE DE TAPA



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

TESIS :	CINETICA DE FORMACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTROLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA SECA	AÑO :	2021
AUTOR:	Arturo Quisbert Mamani	PLANO :	05

ELECTRODO DE CONEXIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

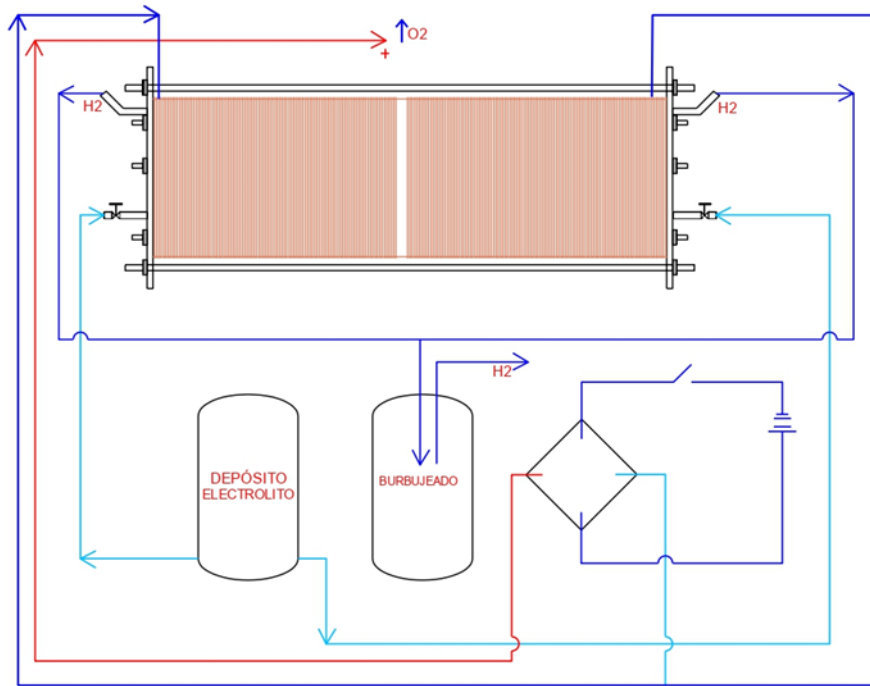
TESIS : CINETICA DE FORMACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE EL
PROCESO DE ELECTROLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA SECA

AÑO : 2021

AUTOR: Arturo Quisbert Mamani

PLANO : 06

ENSAMBLAJE



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

TESIS : CINETICA DE FORMACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE EL
PROCESO DE ELECTROLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA SECA

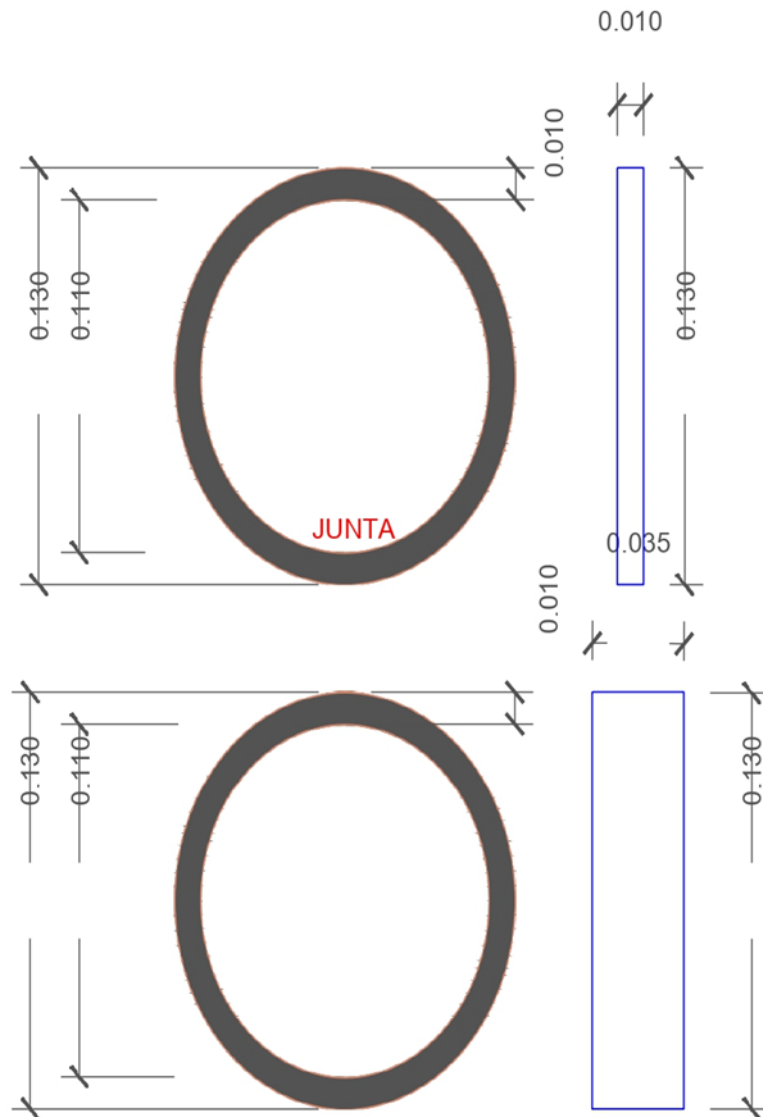
AÑO : 2021

AUTOR: Arturo Quisbert Mamani

PLANO : 09



JUNTA DE SÁLIDA DE OXIGENO



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

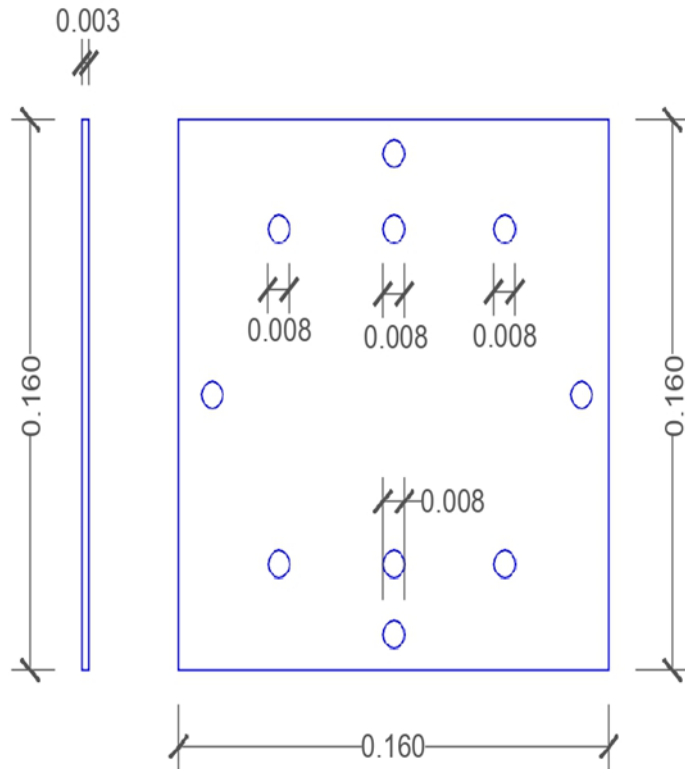
TESIS : CINETICA DE FORMACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE EL
PROCESO DE ELECTROLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA SECA

AÑO : 2021

AUTOR: Arturo Quisbert Mamani

PLANO : 07

PLACA DE CONEXIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

TESIS : CINETICA DE FORMACIÓN DE HIDROGENO MEDIANTE EL
PROCESO DE ELECTROLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA SECA

AÑO : 2021

AUTOR: Arturo Quisbert Mamani

PLANO : 06



**Universidad Nacional del Altiplano -
Puno**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
CORREO ELECTRÓNICO:

fiq@unap.edu.pe CENTRO



EXPERIMENTAL CURTIEMBRE SALCEDO

CONSTANCIA

El que suscribe, Director del Centro Experimental Curtiembre Salcedo dependencia de la FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

HACE CONSTAR QUE:

El Bachiller ARTURO QUISBERT MAMANI ha realizado PRACTICAS EXPERIMENTALES DEL PROYECTO DE TESIS CINÉTICA DE FORMACIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTROLISIS DEL AGUA EN UNA CELDA SECA,

en el Local del Centro Experimental Curtiembre Salcedo, durante los días del 07 de diciembre de 2020 hasta el 30 de enero de 2021.

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado para fines pertinentes.

*Puno, 06 de enero
de 2022*



Firmado
digitalmente
por ZUNIGA
SANCHEZ
Higinio
Alberto FAU
20145496170
soft
Motivo: Soy el
autor del
documento
Fecha:
06.01.2022
12:51:38 -05:00