



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

---



**Licenciatura en Ingeniería Química**

**Tesis presentada para obtener el título de:**  
**LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**Presenta:**

**ALAN NÚÑEZ BORJA**

**Título de Tesis:**

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA MODULAR DE  
REACCIÓN PARA EL ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN  
DE OXÍGENO E HIDRÓGENO A PARTIR DE LA  
ELECTRÓLISIS DEL AGUA”**

**Asesor de tesis:**

**DR. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE**

**Febrero 2018**

## **DEDICATORIA**

*Para mi madre y mi padre. Que sepan que la educación que he recibido, ha rendido uno de tantos frutos.*

*Para mis amigos. Por no permitir que mi vida sea menos interesante y siempre estar ahí cuando los necesito.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres Martha y Alejandro, por siempre apoyarme y recordarme que las recompensas que busco, requieren de un esfuerzo constante.*

*A mi asesor el Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre, por tener el don de la paciencia para enseñarme, no solo en la ingeniería, sino en las virtudes de un buen trabajador.*

*A los demás asesorados del doctor, Karla, Graciela y el Maestro Rodrigo, por enseñarme que el compañerismo es un tesoro y un arma efectiva contra la frustración.*

# ÍNDICE

RESUMEN .....	8
ABSTRACT .....	9
ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO .....	10
• El hidrógeno y su producción .....	11
• Electrólisis del agua .....	12
• Antecedentes históricos de la electrólisis .....	13
• Tecnologías para la producción electrolítica de hidrógeno .....	17
• Implementación de tecnologías renovables .....	20
• El hidrógeno como combustible .....	20
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	23
JUSTIFICACIÓN .....	23
OBJETIVO GENERAL .....	23
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	24
HIPÓTESIS .....	24
METODOLOGÍA .....	25
• Metodología general .....	26
• Metodología del Objetivo Específico 1 .....	27
• Metodología del Objetivo Específico 2 .....	28
• Metodología del Objetivo Específico 3 .....	29
• Metodología del Objetivo Específico 4 .....	31
RESULTADOS .....	32
• Resultado general .....	33
• Resultados del Objetivo Específico 1 .....	34
• Resultados del Objetivo Específico 2 .....	39
• Resultados del Objetivo Específico 3 .....	40
• Resultados del Objetivo Específico 4 .....	45
• Resultados del Objetivo Específico 4 .....	49
• . Resultados del Objetivo Específico 5 .....	50
CONCLUSIONES .....	52
BIBLIOGRAFÍA .....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferentes métodos para la producción de hidrógeno (Rashmi Chaubey, 2013) ...	12
Tabla 2 Factores con mayor influencia en la eficiencia del proceso de electrólisis (K. Mazloomi, 2012) .....	17
Tabla 3. Síntesis de antecedentes en el desarrollo de la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua.....	21
Tabla 4. Listado de fuentes bibliográficas consultadas .....	34
Tabla 5. Tecnologías disponibles para la producción de hidrógeno por medio de electrólisis del agua.....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de funcionamiento de un electrolizador PEM (Barbir, PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, 2005) .....	18
Figura 2. Diagrama de funcionamiento unipolar de un electrolizador alcalino (Alfredo Ursúa, 2012) .....	19
Figura 3. Diagrama de metodología general .....	26
Figura 4 Diagrama de metodología para la revisión de fuentes bibliográficas .....	27
Figura 5. Diagrama de metodología para el análisis de tecnologías disponibles para la electrólisis.....	28
Figura 6. Diagrama de metodología para diseño de equipo .....	29
Figura 7. Diagrama de metodología para el diseño del equipo modular .....	30
Figura 8 Diagrama de proceso de búsqueda y selección de proveedor/fabricante .....	31
Figura 9. Vista frontal del equipo modular de reacción .....	33
Figura 10. Diseño 3D de las placas de acero inoxidable del reactor electrolítico a) placa con carga b) placa neutral.....	40
Figura 11. Diseño 3D de una configuración del reactor electrolítico.....	41
Figura 12. Diseño 3D de las placas de acrílico del reactor electrolítico .....	41
Figura 13. Diseño 3D del arrestador de flama hidáulico.....	41
Figura 14. Diseño 3D del soporte para los reactores electrolíticos .....	42
Figura 15. Diseño 3D del soporte para los reactores electrolíticos (vista posterior).....	42
Figura 16. Diseño 3D del soporte para los reactores electrolíticos (vista frontal) .....	43
Figura 17. Diseño 3D del equipo modular de reacción .....	44
Figura 18. Diseño 3D del equipo modular de reacción con una configuración .....	44
Figura 19. Componentes de la sección superior. La configuración propuesta en la imagen incluye a) tanque de almacenamiento del electrolito y b) arrestador de flama hidráulico ...	45
Figura 20. Vista interior, exterior y acercamiento del sistema de ventilación, el cual posteriormente será programado para ser activado en caso de fuga del gas producido durante el proceso de electrólisis.....	46
Figura 21. Soporte de la sección superior con una configuración que incluye 10 reactores electrolíticos.....	47
Figura 22. Sección inferior del equipo modular de reacción, la cual funciona como almacén de accesorios.....	47

Figura 23. Componentes de los reactores electrolíticos de celda seca. a) Placas de acero inoxidable neutras, b) placas de acrílico, c) placas de acero inoxidable con carga..... 48

Figura 24. Propuesta de configuración del reactor electrolítico de celda seca..... 48

Figura 25. Propuesta alternativa para la configuración de varios reactores electrolíticos de celda seca..... 49

Figura 26. Evidencia de la entrega de los reactores electrolíticos ensamblados ..... 50

## RESUMEN

El empleo de energía se ha convertido en un aspecto clave en la sociedad humana actual al estar presente en el proceso de controlar y adaptar los recursos naturales disponibles, lo que dicta que la producción de diversas formas de energía debe ser constante para satisfacer nuestras continuas necesidades. Esto ha facilitado la gestación y desarrollo de diversos métodos de producción energética así como distintas maneras en que la energía puede ser aprovechada, sin embargo, los combustibles fósiles continúan dominando este campo, aunque es sabido que su manufactura y uso contribuye significativamente al daño irreversible que afecta al ambiente del planeta. Para contrarrestar esta aparentemente ineludible preferencia, es necesario el desarrollo de tecnologías eco-amigables. Varios autores señalan la importancia de las tecnologías que se desarrollan a partir del hidrógeno, cuyo potencial como combustible alternativo se ha incrementado a lo largo de los últimos años.

En el presente trabajo se abordan los distintos métodos de producción existentes para el hidrógeno mediante diversas revisiones bibliográficas, las cuales, al ser analizadas, sugieren la existencia de un área de oportunidad al optimizar el método de producción de hidrógeno más amigable con el ambiente: la electrólisis del agua, por lo que se propone el desarrollo de un equipo, en el cual se pueda llevar a cabo el proceso de electrólisis del agua utilizando reactores de celda seca, con la idea de obtener hidrógeno y oxígeno mediante el uso de un suministro eléctrico provisto por fotoceldas para contrastar la inversión energética requerida. Dicho equipo contará con un diseño modular, es decir, se desarrollará de manera que la manipulación del mismo pueda concentrarse en un módulo de trabajo, lo cual permitirá un estudio de esta tecnología y la conveniencia del hidrógeno como vector energético, así como el posterior desarrollo de nuevas líneas de investigación.



## ABSTRACT

The use of energy has become a key element in present human society, since it is present in the process of controlling and adapting natural resources, this dictates that production of several energy forms has to be constant in order to satisfy our continuous energetic needs. This has facilitated the gestation and development of several energy production methods, as well as many ways in which energy can be seized, nevertheless, fossil fuels continue to dominate this field, even though it is known that its manufacture and use contributes in a significant manner to the irreversible damage that affects the planet. In order to counter this apparently inescapable preference, it is necessary that we develop eco-friendly technologies. Several authors point out the importance of technologies that are developed from hydrogen, which potential as an alternative fuel has increased over the years.

In the present work, the existent production methods for hydrogen are boarded, through diverse bibliographical revisions, which suggest that there is an opportunity area by optimizing the eco-friendlier hydrogen production method: water electrolysis, because of this, an equipment development is proposed, one that can carry out the water electrolysis process by using dry cell electrolytic reactors, with the goal of obtaining hydrogen and oxygen using an electrical energy source provided by photocells in order to contrast the required energetic investment. This equipment will have a modular design, that is, it will be developed in a way that its manipulation can concentrate on a work module, and this will allow a better study of both this technology and the convenience of hydrogen as an energy vector, as well as the posterior development of new line of investigation.

# ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

## **El hidrógeno y su producción**

Es el elemento más ligero, reconocido por Henry Cavendish en 1766; compuesto de un solo protón y un solo electrón, es el elemento más simple y abundante en el universo, no posee color, olor, sabor ni toxicidad. Su producción anual supera los 55 millones de toneladas métricas, esto se debe a que en el planeta Tierra, no es usualmente encontrado en la naturaleza en estado puro, sino unido a otros compuestos como agua, hidrocarburos, entre otros. Existen yacimientos naturales de hidrógeno, sin embargo, son poco usuales, como en el fondo de los océanos donde existen respiraderos que emiten gases presurizados que contienen hidrógeno puro, el cual es producido por medio de una reacción entre el agua de mar y las rocas ferrosas arrojadas del manto terrestre a una alta temperatura y en la ausencia del oxígeno (Marié-Cecile Pera, 2013). Los principales usos industriales del hidrógeno incluyen el proceso de producción de amoníaco (en industrias fertilizantes) mediante el proceso Haber-Bosch y en refinerías de aceite, así como otros usos en la industria alimenticia y metalúrgica (Lehner, 2014).

Debido a la necesidad de este elemento, se encuentran disponibles diversos medios para su obtención, entre estos se encuentran medios termoquímicos, electroquímicos y biológicos, sin embargo, hasta el 2007, todavía el 95% del hidrógeno producido, se formaba por medio de recursos fósiles (48% gas natural, 30% gas refinado, 18% carbón) (Holladay JD, 2009). La mayoría de los procesos industriales se consideran reformaciones de hidrocarburos, y aunque son una de las vías más económicas para la obtención de hidrógeno, no son un procesos renovables ni limpios desde ningún punto de vista (Schulte I., 2004). Los diversos medios de obtención se encuentran detallados en la Tabla 1. Diferentes métodos para la producción de hidrógeno .

**Tabla 1. Diferentes métodos para la producción de hidrógeno (Rashmi Chaubey, 2013)**

Método primario	Proceso	Materia prima	Técnica
Termoquímico	Oxidativo	Hidrocarburos líquidos y gaseosos	Reformación de vapor de metano
			Reformación auto térmica
			Oxidación parcial
			Reformación combinada
			Proceso de plancha de vapor
			Reformación de CO <sub>2</sub> de metano
			Reformación de plasma
			Conversión fotocatalítica
		Carbón	Gasificación
		Biomasa	Pirólisis
No oxidativo	Hidrocarburos líquidos y gaseosos	Hidrocarburos líquidos y gaseosos	Descomposición termal
			Descomposición catalítica
			Proceso de refinamiento
			Plasma
		Biomasa	Pirólisis
	Agua	Separación termoquímica de agua	
Electroquímico	Electrólisis	Agua	Electricidad
	Fotoelectroquímico	Agua	Luz solar directa
Biológico	Fotobiológico	Agua y algas	Luz solar directa
	Digestión anaeróbica	Biomasa	Calor de alta temperatura
	Microorganismos fermentativos	Biomasa	Calor de alta temperatura

Aunque pudieran considerarse como una fuente natural de hidrógeno, en realidad los medios de obtención biológicos usualmente dependen de microorganismos anaeróbicos y fotosintéticos que utilizan materiales ricos en carbohidratos, como algas que utilizan CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O para producir hidrógeno, o algunas bacterias foto heterótrofas que utilizan ácidos orgánicos para producir H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> (Vignais P.M., 2004; Kapdan I.K., 2006). Una conversión exitosa de biomasa a hidrógeno depende bastante del procesamiento de la materia prima, la cual puede ser fermentada mediante microorganismos.

### **Electrólisis del agua**

Entre estos procesos, resalta la electrólisis del agua como el proceso de obtención de hidrógeno más sencillo (Barbir, PEM Electrolysis For Production Of Hydrogen From

Renewable Energy Sources, 2005). La electrólisis es la generación de reacciones químicas de reducción-oxidación, es decir, la transferencia de electrones que ocurren entre un agente reductor y un oxidante, por medio del paso de electricidad a través de los electrolitos para separar agua en sus componentes primordiales: hidrógeno y oxígeno (John C. Kotz, 2010). Es utilizada para la obtención de aluminio, uniendo un metal con otro usando placas eléctricas. Otra forma de electrólisis se utiliza en el agua, cuando la molécula del agua atraviesa por un proceso electroquímico, el agua se separa en gas de oxígeno e hidrógeno (Md Mamoon Rashid, 2015). El suministro de electrones para la electrólisis del agua puede hacerse utilizando distintas fuentes de energía, como la energía fósil o la energía nuclear, sin embargo, la naturaleza no renovable de la energía fósil nos obliga a dejar de utilizarla como recurso, y el alto nivel de riesgo de la energía nuclear lo elimina como posibilidad para este trabajo, por lo que se utilizará la energía solar para realizar la electrólisis. La producción de hidrógeno utilizando energía solar se divide en cuatro principales métodos: fotovoltaicos, termales, foto-electrolíticos y bio-fotolíticos (Fatih Yilmaz, 2016).

El principio de operación de un componente electroquímico consiste en un electrodo positivo y uno negativo, separados por un electrolito que puede ser líquido o sólido, donde se llevará a cabo la reacción reducción/oxidación, específicamente, cada electrodo es el sitio de oxidación (pérdida de electrones) o reducción (obtención de electrones) dependiendo de la dirección de la corriente que fluye a través del componente. Los electrodos deben ser buenos conductores eléctricos y el electrolito debe ser un buen conductor de iones y un buen aislante de electrones, para evitar un corto circuito entre ambos electrodos. Las reacciones consumen al reactante y forman productos, los cuales deben ser evacuados del área de reacción. Finalmente, en todos estos fenómenos son acompañados por intercambios de calor, el desempeño y vida útil de los componentes es de crucial importancia para su implementación en los sistemas eléctricos. (Marié-Cecile Pera, 2013).

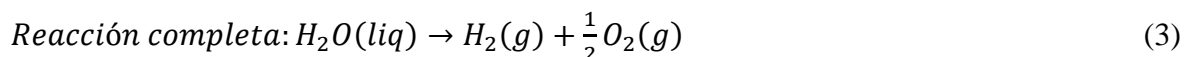
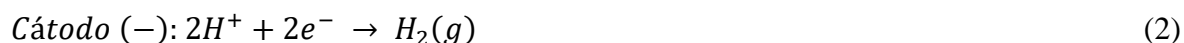
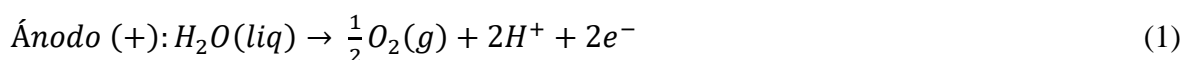
### **Antecedentes históricos de la electrólisis**

Los primeros usos de la electrólisis datan desde hace más de doscientos años, Adriaan Paers van Troostwijk y Jan Rudolph Deiman fueron los primeros que observaron la

descomposición del agua en “aire combustible” y “aire de vida” al aplicarle descargas eléctricas, en 1789 (Lehner, 2014). Alrededor de 1800 el principio fue consistentemente demostrado por J.W. Ritter en Alemania y la descomposición del gas obtenido mediante el proceso en hidrógeno y oxígeno sucedió el mismo año en Inglaterra por parte de William Nicholson y Anthony Carlisle (Md Mamoon Rashid, 2015).

Posteriormente, Faraday publicaría en 1834 las leyes que rigen este fenómeno, las cuales consisten en poder calcular el flujo de reactivos y productos involucrados en las reacciones. La electrólisis fue aplicada por primera vez para la producción de hidrógeno por William Grove en 1839 (James Larminie, 2003).

Las reacciones que toman lugar en el electrolito, se muestran mediante las ecuaciones 1, 2 y 3 (P. Millet, 2013):



Gramme pudo desarrollar su dínamo en 1868, esto permitió una obtención económica de energía eléctrica alterna, lo que facilitó la investigación de este proceso. En los años siguientes se desarrollarían modelos que incluían características importantes, como en 1887 cuando en el French Collège de France, bajo el cargo del Dr. A d’Arsonval utilizaron cilindros perforados de hierro (20cm x 60 cm) como cátodos y ánodos y podía producir hasta 100 m<sup>3</sup> por día de oxígeno; el electrolizador utilizaba una solución de KOH al 30%. En la misma fecha y lugar, Cdt Renard desarrolló un electrolizador para inflar globos, podía utilizar soluciones ácidas o electrolitos alcalinos (NaOH al 15% peso) y podía producir 158 litros por hora de hidrógeno.

Aunque el hidrógeno comenzaba a ganar auge en su producción, no veía aplicaciones como un combustible formal hasta 1890 cuando Charles Renard construyera un generador para usarlo en vehículos aéreos militares.

Garuti y Pompili construyeron una planta en 1893 con 50 celdas electrolíticas, cada una con instrumentos de medición y compresión de gases. Los electrolizadores usaron electrodos de hierro conectados de manera paralela y un alcalino electrolito que se asume, era una solución de ácido sulfúrico, el gas producido era separado mediante diafragmas colocados en el fondo de campanas utilizadas para la recolección de gases producidos (Hale, 1919).

En 1900, una patente registrada a nombre de Dr. Schmidt (Alemania Patente nº 111,131, 1899) fue manufacturada y comercializada por Oerlikon, lo que permitió el avance de producción en masa utilizando 110 V. Su electrolizador venía en distintas presentaciones dependiendo de la producción deseada, desde 163 hasta 2750 litros por hora, para 1902 ya había más de 400 de estas unidades en operación.

Entre 1920 y 1930 la necesidad de producir amoníaco mediante el proceso Haber-Bosch llevó a un estímulo del desarrollo de electrolizadores, y Norsk Hydro construyeron el primer electrolizador a gran escala, con una capacidad de producción de 27,900 m<sup>3</sup>/h de hidrógeno.

En 1948 Wilhelm y Winsel produjeron los primeros electrodos de níquel o electrodos Raney, esto incrementó significativamente el desempeño del cátodo (que es donde se produce el hidrógeno), estos electrodos se implementaron en electrolizadores industriales en 1957. En la década de 1950 llegó el dominio de los hidrocarburos en la industria, esto llevó al impulso de la obtención de hidrógeno a través de gasificación de carbón y reformación de vapor, por lo que las ventajas económicas de la electrólisis gradualmente disminuyeron.

Durante la década de los 60 surgieron los programas espaciales GEMINI y APOLLO, lo que incrementó la investigación en las celdas PEM. Más tarde, en 1967, Costa y Grimes introdujeron el concepto de “cero brechas”, cuyo objetivo era reducir la resistencia de la celda electrolítica al reducir la distancia de los electrodos, el cual fue un concepto sobresaliente en el desarrollo de los electrolizadores. (Marié-Cecile Pera, 2013)

En la década de 1970 las aplicaciones militares y espaciales relacionadas con la producción de oxígeno, permitirían el siguiente paso en el desarrollo tecnológico de los electrolizadores, al facilitar el redimensionamiento de estos dispositivos en una presentación más pequeña y práctica, mientras tanto, se lograba una mayor comercialización de esta tecnología, esto permitió que para 1978 emergiera los electrolizadores alcalinos “avanzados”, que se refiere

a que poseían avances tecnológicos como funcionamiento a altas presiones, altas temperaturas, electrodos de brecha o celdas sólidas. En la misma década, surgió la primera mención de la “economía de hidrógeno”, en la primera Conferencia Mundial del Hidrógeno en 1976, donde por primera vez se identificó al hidrógeno como un vector energético limpio para el futuro (R. Moliner, 2016). En el año de 1987, Suiza produjo el primer prototipo electrolizador que tenía una capacidad de producción de 20 m<sup>3</sup>/h de hidrógeno a 2 bares, con un consumo de poder de 100 kW.

Con la excepción de Japón, quienes lanzaron el programa WE-NET en 1993 cuyo objetivo era almacenar energías renovables vía hidrógeno, no hubo mayor avance tecnológico notable en la década de los 90, aunque a principios del siglo XXI el interés en esta tecnología se reanudó, y el nuevo objetivo ha sido la reducción de la temperatura de operación y la implementación de tecnologías renovables para resolver la inversión energética.

Recientemente, los estudios dedicados a la electrólisis han iluminado algunos factores que los electrolizadores industriales permiten controlar (temperatura, presión, etc.) para influir en la producción. Por ejemplo, las altas temperaturas permiten un proceso de electrólisis más eficiente debido a las características termodinámicas de la molécula del agua, ya que su potencial de reacción al separarse se reduce al incrementar la temperatura (V. M. Nikolic, 2010). La temperatura también influye en la conductividad iónica del electrolito, así como las reacciones que se llevan a cabo en su superficie (J. Udagawa, 2007).

Aunque ya se tenía conocimiento acerca de la reducción de espacio entre los electrodos aproximadamente desde 1980 (R.L. LeRoy, 1980) se demostró que aunque el reducir la distancia entre electrodos se puede obtener una menor resistencia eléctrica, colocar los electrodos demasiado cerca el uno del otro puede provocar un proceso menos eficiente al incrementar la fracción de vacío, que representa las burbujas que aparecen en el proceso de electrólisis y disminuyen la superficie de contacto que se tiene con el electrolito. (N. Nagai, 2003) .

En cuanto a la presión del proceso, la electrólisis realizada a altas presiones consume menos energía en el proceso de descomposición electrolítica. La razón de esto se debe a la compresión de las burbujas de gas que ocasionan una caída de voltaje óhmico y disipación de potencia (A.J. Appleby, 1978). La explicación para justificar la facilidad que proporciona



el incremento en temperatura y presión en el proceso de electrólisis yace en que ambas propiedades cambian la energía de Gibbs y los niveles de entalpía de un proceso electrolítico, aunque hay un límite para estos parámetros, presiones mayores a 20 MPa el aumento de voltaje es prácticamente nulo si la temperatura permanece constante. Las condiciones ideales para maximizar la eficiencia de la electrólisis son alrededor de 70 MPa y 250°C (K. Onda, 2004).

Los resultados de las recientes investigaciones dedicadas al incremento de la eficiencia en el proceso de producción de hidrógeno mediante electrólisis se resumen en la Tabla 2.

**Tabla 2 Factores con mayor influencia en la eficiencia del proceso de electrólisis (K. Mazloomi, 2012)**

<b>a.</b>	La eficiencia se incrementa a altas temperaturas y altas presiones. Estos parámetros pueden ser aumentados hasta los límites físicos permitidos por el equipo utilizado.
<b>b.</b>	El uso de electrolitos altamente concentrados arrojará menores valores de impedancia. Por otro lado, el uso de soluciones contaminadas causa reacciones secundarias en la celda electrolítica y reducirá el tiempo de vida del equipo-
<b>c.</b>	Forzar las burbujas a separarse de la superficie del electrodo disminuye la impedancia y se podrán alcanzar altos niveles de eficiencia.
<b>d.</b>	La selección de electrodos es un factor importante.
<b>e.</b>	Ya que las celdas electrolíticas tradicionalmente contienen elementos no lineales, se requiere una mayor investigación para estudiar el mejor método de aplicación de energía a la celda.

Gracias al apoyo provisto por los análisis de impacto ambiental, la producción electrolítica de hidrógeno está ganando importancia de manera gradual entre otros procesos convencionales para producir hidrógeno, en el 2003 el electrolizador industrial más grande poseía una capacidad de producción de 380,000 kg H<sub>2</sub>/año (Ivy, 2004) y en el 2010 la compañía manufacturera Industrie Haute Technologic desarrolló un modelo de electrolizador que puede generar hasta 760 m<sup>3</sup>/h, con una eficiencia mayor al 80% (Alfredo Ursúa, 2012), lo que indica el nivel de avance que este tipo de tecnología ha obtenido en los últimos años.

### **Tecnologías para la producción electrolítica de hidrógeno**

Dentro de las tecnologías disponibles para la electrólisis del agua, se encuentran:

1. Tecnología PEM. El diseño de un electrolizador PEM (por sus siglas en inglés, Proton Exchange Membrane, o Membrana de Intercambio de Protones) consiste de un bloque de celdas elementales conectadas en serie por placas bipolares. Cada celda contiene dos electrodos separados por una PEM. Cada electrodo contiene una capa catalítica delgada que es el sitio de oxidación (ánodo) o reacción de reducción (cátodo) y capas de materiales porosos que actúan como distribuidores o receptores dependiendo del electrodo, lo que hace otorga flexibilidad mecánica. El agua se separa en oxígeno, protones y electrones en el ánodo, aplicando voltaje de corriente directa. Los protones pasan a través de la membrana electrolítica y en el cátodo se combinan con los electrones para formar hidrógeno, este proceso se ilustra en la Figura 1. Un electrolizador PEM no puede contener material vulnerable a la corrosión electrolítica (principalmente materiales de carbón) por lo que deben usar materiales metálicos, típicamente platino o una aleación de platino., esto eleva el costo de este tipo de tecnología (K.C. Sandeep, 2017).

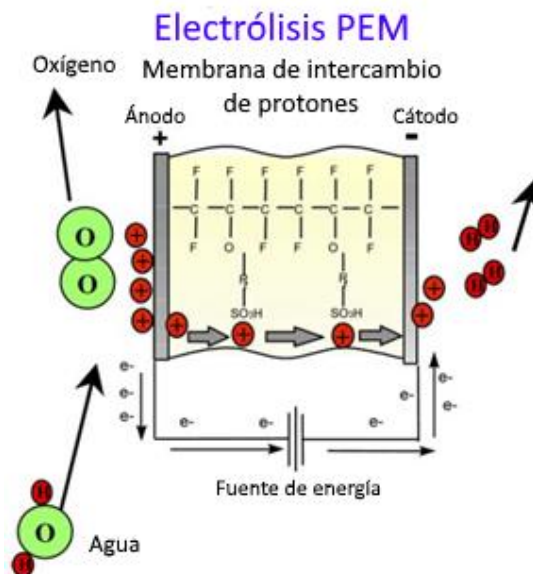


Figura 1. Diagrama de funcionamiento de un electrolizador PEM (Barbir, PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, 2005)

2. Tecnología SO. Similar en estructura a un electrolizador PEM, pero los electrolizadores SO (por sus siglas en inglés Solid Oxide, u Óxido Sólido) se concentran en la electrólisis a altas temperaturas, ya que como se mencionó anteriormente, es una condición que favorece el desempeño de la electrólisis, sin

embargo, es la tecnología electrolítica que se encuentra en una menor etapa de desarrollo, ya que las altas temperaturas conllevan expansión de los materiales, lo que obliga a usar materiales con coeficientes de expansión termal compatibles, pero que no tienen un buen desempeño eléctrico (Jan Pawel Stempien, 2013).

3. Tecnología alcalina: la tecnología disponible para electrólisis más sencilla consiste en dos electrodos (típicamente hechos de níquel), un electrolito y opcionalmente, un agente separador, si desea evitarse la recombinación química del oxígeno e hidrógeno. Se conforma de varias celdas, configuradas de manera paralela (unipolar) o en serie (bipolar), aunque la configuración unipolar es más sencilla y barata, conlleva pérdidas de desempeño mayores. Su funcionamiento se encuentra ilustrado en la Figura 2. La configuración bipolar reduce estas pérdidas pero requiere mayor precisión en el diseño y manufactura para evitar fugas, pues típicamente compacta las celdas a presión. Es la tecnología con mayor acceso comercial en la actualidad.

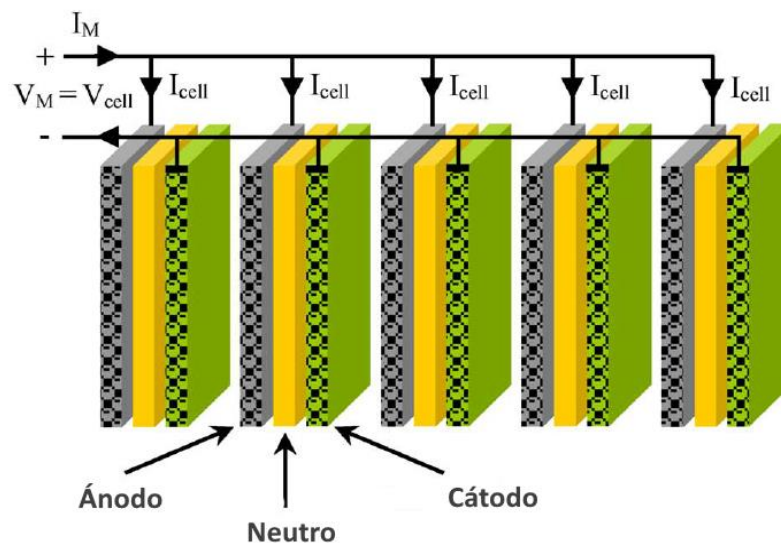


Figura 2. Diagrama de funcionamiento unipolar de un electrolizador alcalino (Alfredo Ursúa, 2012)

Las ventajas que poseen las celdas secas es que al contener el electrolito, se utiliza un volumen menor del mismo, y como solo una parte de la celda se encuentra en contacto con el electrolito, no sufrirá el mismo grado de corrosión que la celda húmeda (Attila Göllei, 2015).

Habiendo leído con detalle las características de cada una de las tecnologías disponibles, se tomó la decisión de trabajar con la electrólisis alcalina, debido a que su simplicidad otorga una facilidad para estudiar el proceso. El tipo de tecnología que se revisará en este trabajo serán los reactores de celda seca, pues la información específica acerca de su funcionamiento es escasa en fuentes de carácter investigativo, al encontrarse la mayoría de la información en trabajos informales o comerciales, cuya veracidad se encuentra predispuesta a ventas. Aunado a esto se encuentra su relativamente bajo costo comparado con las otras tecnologías disponibles.

## **Implementación de tecnologías renovables**

El uso de celdas solares para la producción de hidrógeno mediante la electrólisis de agua comenzó en 1970, aunque la efectividad de esta integración siempre ha estado anclada al desarrollo tecnológico de las celdas fotovoltaicas, por lo que desde su concepción no fue percibido como un proceso que fuera de costo efectivo, aunque siempre se ha clasificado como un método que requiere una extensiva investigación. Algunos estudios reportan que la pureza del hidrógeno obtenido mediante la electrólisis utilizando energía eléctrica provista por fotoceldas llega a más del 90% (Abdin Z., 2015). Aunque las celdas fotovoltaicas usualmente representan el mayor costo de inversión en un proceso de electrólisis, las tecnologías recientes permiten que éstas posean una durabilidad inmensa. El estudio de Chamberlin *et al* de 2011 sugiere que la durabilidad de una celda fotovoltaica, en condiciones de trabajo perpetuas y en un ambiente que podría considerarse corrosivo, tienen una enorme durabilidad, en los más de 10 años de uso de las celdas fotovoltaicas monocristalinas, su desempeño solo disminuyó un 16%; por lo que puede concluirse que si las celdas fotovoltaicas representan la mayor inversión en la producción electrolítica de hidrógeno, es una inversión que rendirá frutos en el futuro.

## **El hidrógeno como combustible**

Los combustibles fósiles, que alguna vez fueron la solución a la problemática que representaba la necesidad de energía requerida para continuar con el avance tecnológico humano, son vistos ahora como una fuente no sustentable, ya que su renovación es

prácticamente nula y comprometen la atmósfera bajo la cual vivimos al producir gases contaminantes durante su producción y su uso ((IPCC), Available 2007).

Ante lo que puede ser considerado como una inminente crisis, las alternativas energéticas que no son dependientes del carbón son limitadas, incluso con el uso de tecnologías renovables, la viabilidad de las mismas a largo plazo no permite que la industria las perciba como fuentes de energía confiables, por lo que es imperativo desarrollar estas tecnologías hasta estandarizarlas. Varias de estas tecnologías se centran en el hidrógeno, el cual ha sido visto como un combustible competente desde el siglo XIX, (Richards, 1901) sin embargo, aún no ha sido estudiado completamente. Su obtención es un proceso que usualmente consume una elevada cantidad de energía en contraste con lo que se puede esperar del mismo (Ivy, 2004), aunque tiene la capacidad de transportar y/o almacenar energía, generar potencia y hacer un sistema de almacenamiento de energía, con poco o nulo impacto en el ambiente (P. P. Edwards, 2007) por lo que es considerado un vector energético, que si pudiera incrementarse su producción, sería capaz de satisfacer demandas energéticas modernas y podría ser aplicado para asegurar el suplemento de energía con creciente utilización en localidades apartadas (Goran Krajacic, 2008).

**Tabla 3. Síntesis de antecedentes en el desarrollo de la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua**

<b>Autores</b>	<b>Año</b>	<b>Acontecimiento</b>
Paets van Troostwijk y Deiman	<b>1789</b>	Se utilizó una máquina electrostática para generar electricidad dentro de un cuerpo de agua.
J.W. Ritter	<b>1800</b>	Se demuestra por primera vez el principio de la electrólisis.
William Nicholson y Anthony Carlisle	<b>1800</b>	Se separa por primera vez el agua en oxígeno e hidrógeno por medio de electrólisis.
Charles Faraday	<b>1834</b>	Se publican las dos leyes de electrólisis de Faraday que explican matemáticamente la electrólisis.
Zénobe Théophile Gramme	<b>1868</b>	Se desarrolla el Dínamo Gramme, considerado el primer electrolizador de corriente alterna, esto facilitó la obtención de electricidad e impulsó la investigación de la electrólisis.
Ecole Supérieure d'Electricité (d'Arsonval y dt Renard).	<b>1885</b>	Se instala el primer electrolizador que genera oxígeno, con electrodos cilíndricos de acero y potasio como electrolito. Producía 150 litros por día.
Dimitry Lachinov	<b>1888</b>	Se desarrolla la primera máquina con numerosos electrodos bipolares y tanque recolector, usando soluciones alcalinas como electrolitos.

<b>Autores</b>	<b>Año</b>	<b>Acontecimiento</b>
Charles Renard	<b>1890</b>	Se utiliza hidrógeno por primera vez como combustible para una nave aérea militar.
Garuti y Pompili	<b>1893</b>	Se construye una planta electrolizadora de alta capacidad utilizando ácido sulfúrico como electrolito.
O. Schmidt	<b>1899</b>	Se presenta el primer electrolizador industrial bipolar manufacturado por Oerlikon.
Oerlikon, Norsk Hydro, Cominco	<b>1920</b>	Los electrolizadores fueron comercializados, principalmente para obtener hidrógeno para la producción de amoniaco.
Jacob Emil Noeggenrath	<b>1924</b>	Se inventó el primer electrolizador que funciona con altas presiones (más de 100 bar) y se patenta el diseño.
Murray Raney	<b>1926</b>	Se obtiene una aleación de níquel y aluminio utilizando sosa cáustica, lo que fue el antecedente a la electrólisis alcalina.
Ewald Arno Zdansky	<b>1948</b>	Se desarrolla el primer electrolizador presurizado industrial.
Eduard Wilhelm, Leonhard Justi	<b>1948</b>	Se producen los primeros electrodos de níquel, al estudiar a fondo la producción desde el cátodo, y se comienzan a usar desde 1957.
NASA	<b>1960</b>	Los programas espaciales GEMINI y APOLLO incrementaron la investigación de celdas electrolíticas.
R.L. Costa, P.G. Grimes	<b>1967</b>	Se introduce el concepto de cero brecha, donde se estudia la disminución de resistencia en la celda electrolítica reduciendo la distancia entre los electrodos.
Conferencia mundial del Hidrógeno	<b>1976</b>	Se identificó por primera vez al hidrógeno como un vector energético limpio.
Appleby	<b>1978</b>	Se identifican a las burbujas producidas en el proceso como uno de los principales factores que reducen la eficiencia del proceso electrolítico.
LeRoy	<b>1980</b>	Se explica el fenómeno de reducción de distancia entre electrodos.
Stellram SA	<b>1987</b>	Opera el primer prototipo electrolizador “avanzado” que trabajaba a altas presiones y temperaturas.
Onda	<b>2004</b>	Se determinan las propiedades que alteran las condiciones de presión y temperatura en el proceso electrolítico, y se determinan las condiciones ideales para la electrólisis (70 MPa, 250 °C).
Udagawa	<b>2007</b>	Se determina que el potencial de reacción de la separación de la molécula del agua se reduce al incrementar la temperatura.
Industrie Haute Technologic	<b>2010</b>	Opera el primer electrolizador generador de hasta 760 m <sup>3</sup> /h con una eficiencia mayor al 80%.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La electrólisis es el método más sencillo que existe actualmente para la producción de hidrógeno, sin embargo, no suele ser percibido como un medio de producción sostenible para el mismo, debido a la dificultad que representa el control de las diversas variables involucradas en el proceso, lo que típicamente conlleva a una baja eficiencia y altos riesgos, esto es debido en gran parte al poco estudio que se le ha dedicado a esta tecnología, por ende, no ha sido posible desarrollar propiamente un estándar de tecnologías con respecto a la producción de este elemento. La inversión energética necesaria para este método suele propiciar la búsqueda de otros medios de producción, ya que la energía eléctrica es una de las formas de energía más caras involucradas en los procesos de electrolisis propuestos.

## JUSTIFICACIÓN

Como lo mencionan Krajacic *et al*, si el hidrógeno es investigado con mayor atención y recursos, podría resultar en un combustible para el futuro, uno que provee energía suficiente para satisfacer la demanda mundial, y prácticamente inocuo con respecto al medio ambiente. Siendo la electrólisis del agua el proceso de obtención de hidrógeno más limpio es imperativo un estudio extenso de este proceso y sus variables, lo cual permita entender y estandarizar las tecnologías aplicadas en este medio de producción. Junto a ello, es indispensable la implementación de energías renovables para solventar la inversión energética. Para esto, es necesario el desarrollo de un equipo modular que pueda producir hidrógeno mediante la electrólisis del agua, que posea la capacidad de adaptarse a energías renovables, y que además pueda servir como objeto de estudio, pudiendo caracterizarse con distintas configuraciones, como conexiones en serie y paralelo, número de placas en los reactores electrolíticos de celda seca, entre otros, todo esto para analizar los factores que afectan la eficiencia de producción de hidrógeno, así como la energía requerida para que éste proceso pueda lograrse.

## OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema modular de reacción para el estudio de la producción de oxígeno e hidrógeno a partir de la electrólisis del agua, identificando los diversos factores que influyen en la eficiencia del proceso, cuya fuente de energía pueda alternarse entre energía eléctrica convencional y electricidad provista por celdas fotovoltaicas que conviertan la energía solar en energía eléctrica.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar un extenso análisis de antecedentes acerca del hidrógeno, su importancia como sustancia y como vector energético, sus distintos métodos de producción y los factores que influyen en la eficiencia de los mismos.
2. Comparar y analizar las diferentes tecnologías disponibles actualmente para los equipos que llevan a cabo procesos de electrólisis de agua.
3. Diseñar un sistema modular de para la producción gas oxihidrógeno a partir de la electrólisis del agua, que sea funcional, capaz de alternar entre el uso de energía eléctrica comercial, así como también el uso de energía eléctrica provista de una celda fotovoltaica para el estudio del proceso de producción de hidrógeno.
4. Llevar a cabo el plan de trabajo para el diseño, la manufactura y la puesta en marcha del equipo propuesto.
5. Elaborar un manual para la operación del equipo.

## HIPÓTESIS

Se espera que al diseñar un sistema modular de reacción para la producción de hidrógeno y oxígeno por medio de electrólisis, se produzca un mayor entendimiento de la naturaleza del proceso y el fenómeno, así como la planeación de posibles rutas para estandarizar el proceso, lo que llevaría a determinar diferentes perfiles con la posibilidad de que alguno de ellos presente una ruta de optimización diferente a las encontradas en la literatura, revisadas en los antecedentes, además, se espera que sea posible adaptar este sistema con fuentes de energía renovables como la energía solar, Esto permitiría la aplicación de esta tecnología en procesos industriales actuales.



# METODOLOGÍA

## Metodología general

En este capítulo, se especifica la metodología empleada para desarrollar el sistema de reacción de electrólisis para hidrógeno, para ello se propone abordar los objetivos específicos planteados como se muestran en la Figura 3, destacando como fundamental el primer objetivo específico, dada la necesidad de contar con la suficiente información respecto de los tópicos pertinentes al proyecto, con ello tenemos la posibilidad de comparar, analizar y evaluar distintas perspectivas entre diferentes tecnologías y procesos disponibles, que nos permitirán desarrollar una propuesta para el sistema modular, a partir de la geometría fundamental y los procesos disponibles. Es importante destacar que en esta etapa también se acoplará al diseño un sistema de paneles solares como fuente energética alterna.

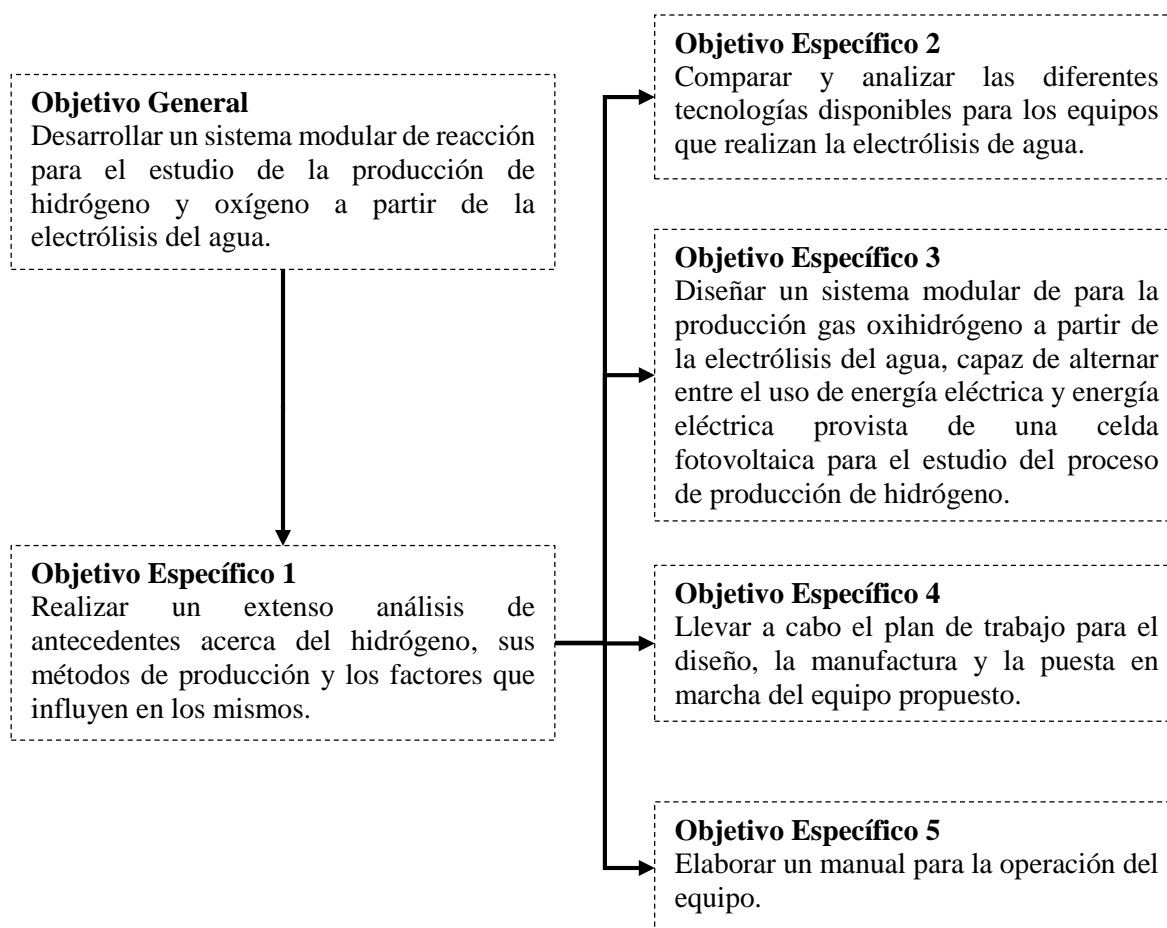


Figura 3. Diagrama de metodología general

## Metodología del Objetivo Específico 1

Por otro lado, la base de este trabajo parte del hecho de que este proceso ha sido estudiado desde hace tiempo, pero la mayoría de esos estudios no se realizaron con la tecnología ni con los materiales con los que contamos actualmente, sin embargo, vale la pena retomar los estudios realizados debido a la necesidad de contar con suficiente información del diseño del reactor, los electrodos, las herramientas de diseño, entre otros, con lo cual, además de conocer el estado del arte de la producción de hidrógeno. También, se realiza una investigación a las líneas que se consideran los pilares del proyecto: diseño mecánico y físico del proceso, y los fundamentos, avances y aplicaciones de la electrólisis. Las metodologías propuestas para abordar estos aspectos del trabajo se encuentran en la Figura 6.

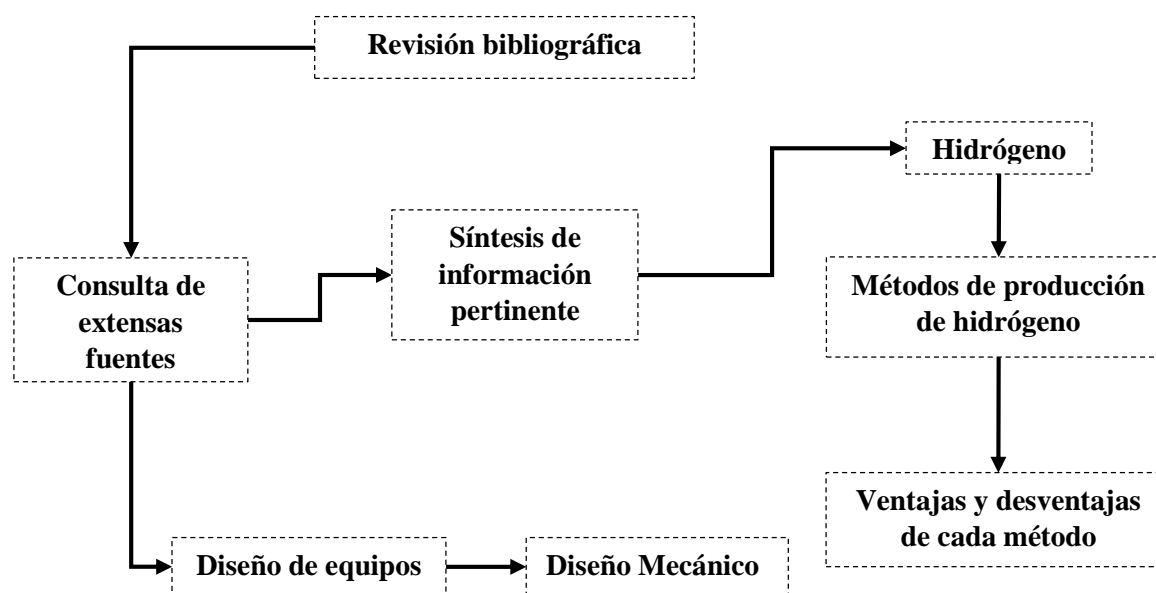


Figura 4 Diagrama de metodología para la revisión de fuentes bibliográficas

## Metodología del Objetivo Específico 2

Una vez que se han obtenido los antecedentes que nos permiten determinar el estado del arte tanto de la técnica como el proceso y la tecnología alrededor de la producción de hidrogeno, se procede a pueden recabar y sintetizar detalles técnicos específicos tanto del proceso de electrólisis, como de las tecnologías y servicios auxiliares disponibles para este proceso. Todo esto nos lleva a un proceso de selección de parámetros, a través del cual se elige el método más práctico para realizar la electrólisis, tomando en cuenta aspectos como costo, complejidad del método, los alcances que posee este trabajo, entre otros. El procedimiento se detalla el diagrama en la Figura 5

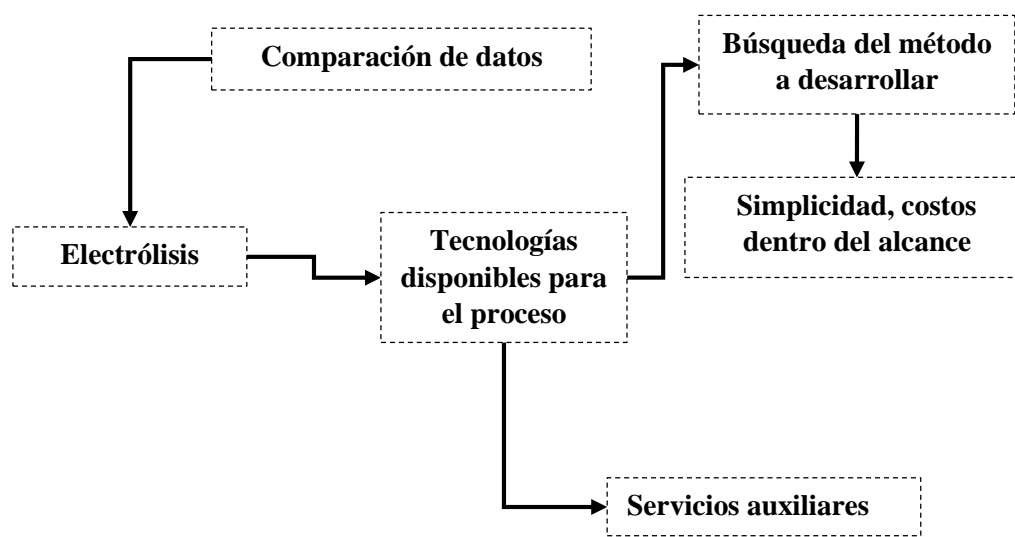


Figura 5. Diagrama de metodología para el análisis de tecnologías disponibles para la electrólisis

### Metodología del Objetivo Específico 3

En lo que corresponde al desarrollo del tercer objetivo específico, se llevó a cabo el diseño del equipo, se parte de la necesidad de alojar un sistema de reacción electrolítica provisto de accesorios, tales como: válvulas, tuberías, tanque de almacenamiento, entre otros; dadas las condiciones pertinentes al espacio disponible para el proyecto en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, en la Facultad de Ingeniería Química, en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). La metodología básica para este objetivo se encuentra en la Figura 6.

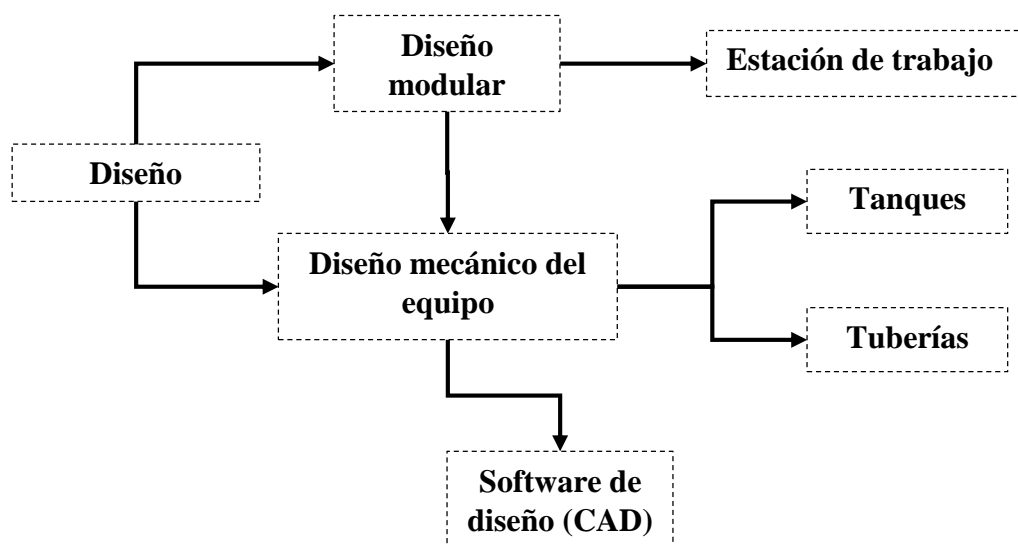


Figura 6. Diagrama de metodología para diseño de equipo

Otros aspectos importantes de este diseño deben incluirse en el equipo, tales como la barrera de seguridad que permite aislar el sistema de reacción del medio circundante, y que al mismo debe permitir fácil acceso cuando sea necesario interactuar físicamente con el reactor o cualquiera de sus componentes, también considerar como importante la posibilidad de poder observar el interior del equipo durante la operación y por supuesto tener la maleabilidad y resistencia en caso de una expansión súbita de gas, estos detalles se abordaran de acuerdo al diagrama propuesto en la Figura 7.

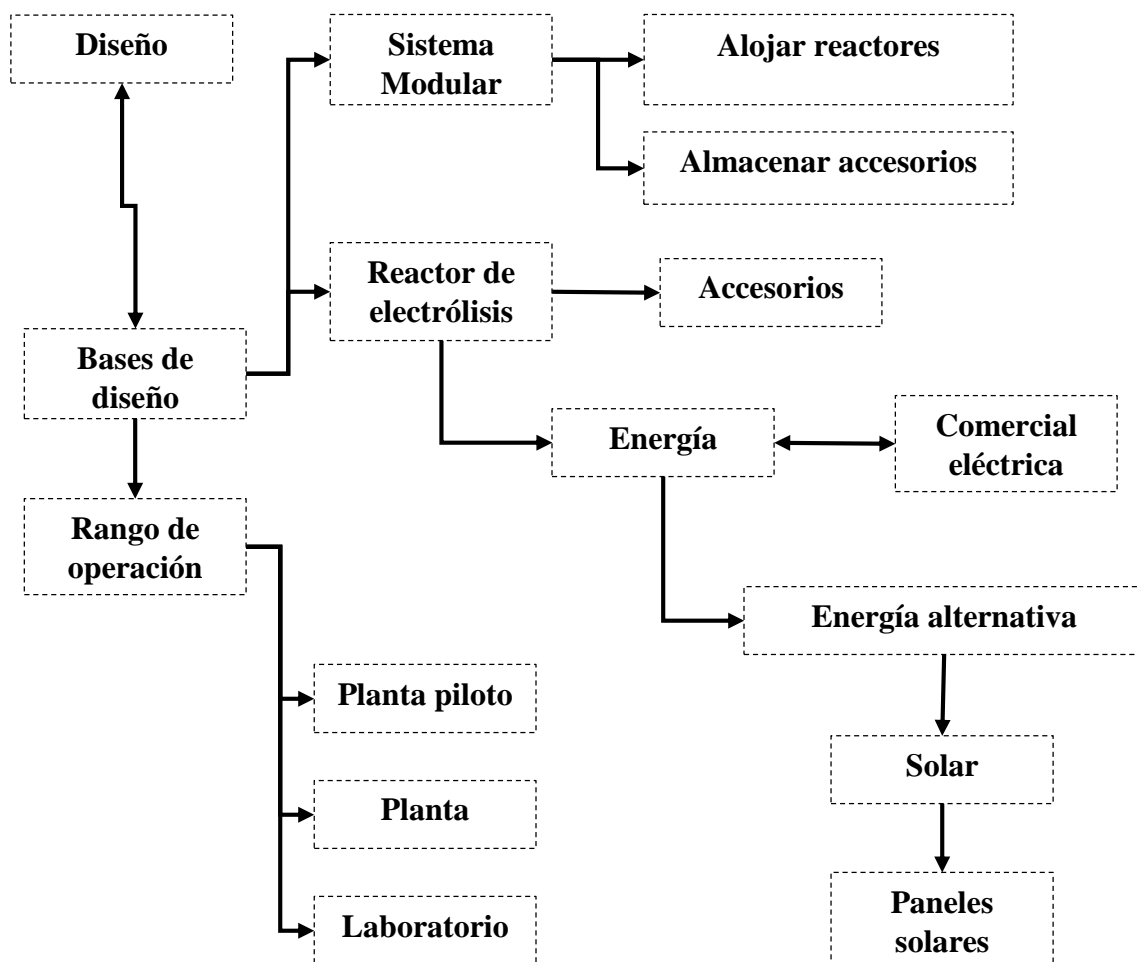


Figura 7. Diagrama de metodología para el diseño del equipo modular

#### Metodología del Objetivo Específico 4

Una vez terminada la etapa de diseño se procederá a revisar en conjunto con un proveedor de construcción de equipo los datos técnicos así como también las especificaciones y capacidades esperadas para el equipo propuesto, la metodología incluye más de una sesión de trabajo pero por practicidad en el diagrama propuesto solo aparecerá 1 vez, también de manera paralela se llevará a cabo la entrega de componentes que estén terminados por parte del proveedor mientras se lleva a cabo el ensamble del equipo. Todo esto se encuentra detallado en el diagrama ilustrado en la Figura 8.

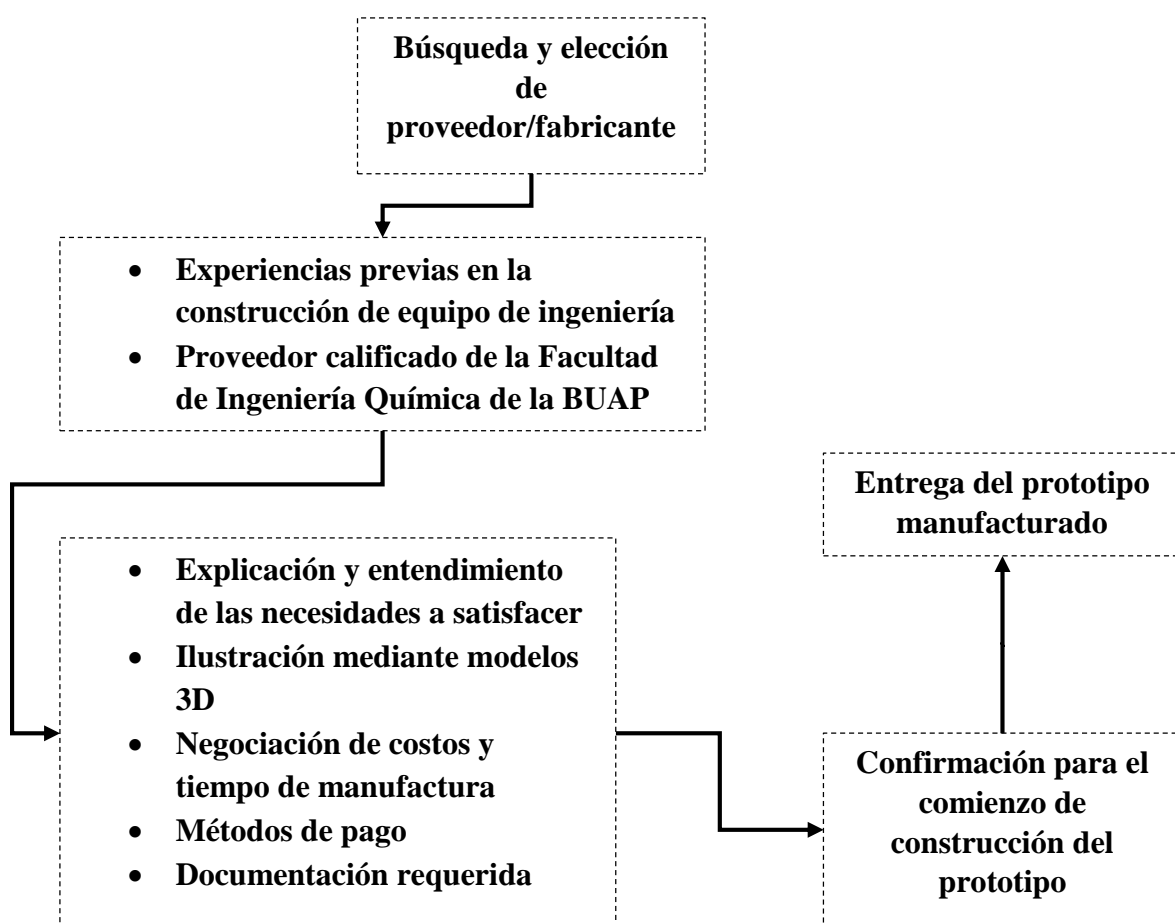


Figura 8 Diagrama de proceso de búsqueda y selección de proveedor/fabricante

# RESULTADOS



## Resultado general

Se desarrolló un sistema modular de reacción para el estudio de la producción de oxígeno e hidrógeno a partir de la electrólisis del agua, con dimensiones de 210x105x60 cm el cual está conformado por dos secciones principales: la primera sección se encuentra en la parte superior y es donde se da alojamiento al sistema de reacción y sus accesorios, mientras que en la segunda sección, encontrada en la parte inferior, se provee un espacio común de almacenamiento para los componentes y accesorios del sistema modular respectivamente como se muestra en la Figura 9.

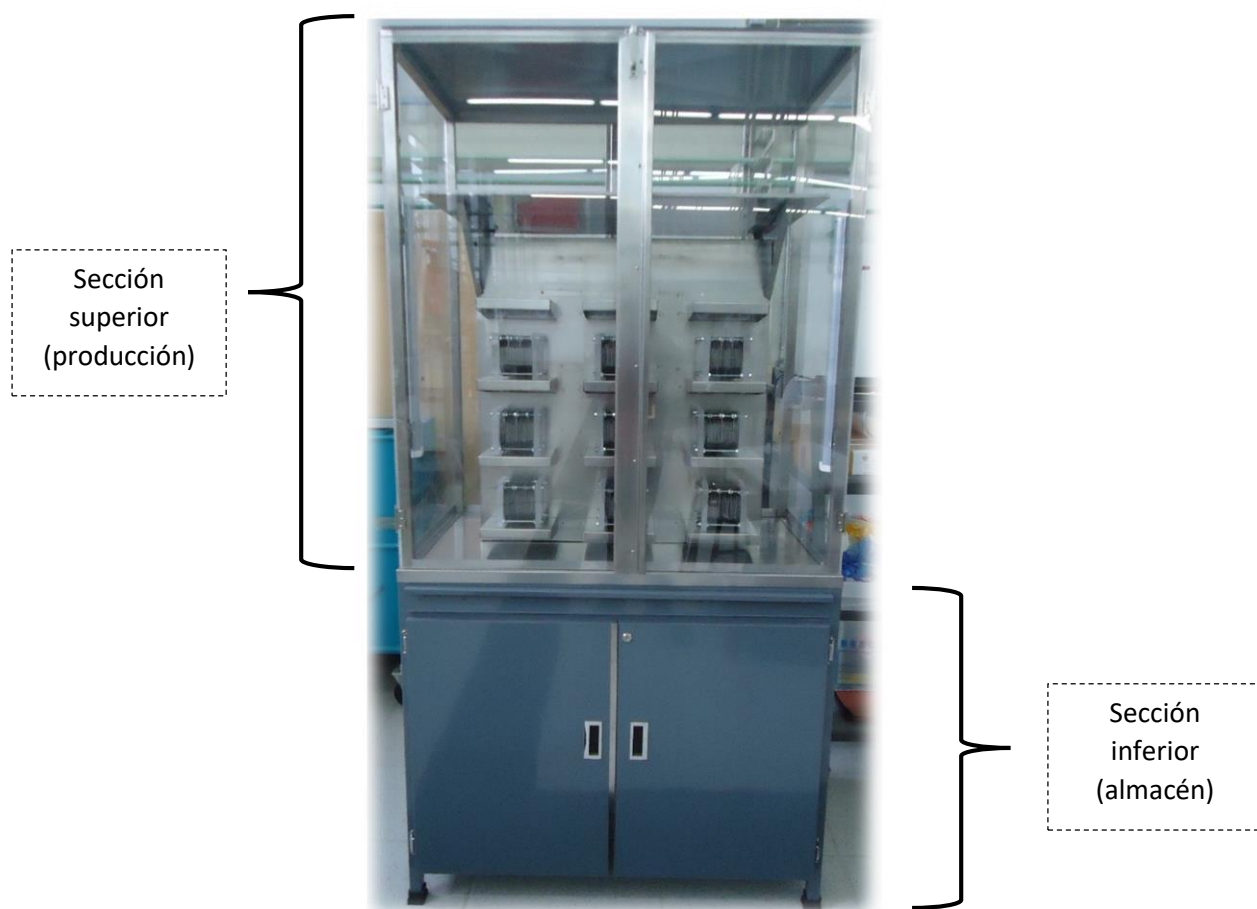


Figura 9. Vista frontal del equipo modular de reacción

La sección superior cuenta con dimensiones de 120x105x60 cm y un estante con soporte ubicado en la parte central con dimensiones 80x76x1.5 cm capaz de alojar como máximo hasta 12 reactores con 30 placas.

## Resultados del Objetivo Específico 1

Se realizó una extensa revisión bibliográfica de donde fue posible sintetizar alrededor de 40 fuentes bibliográficas, las cuales están comprendidas en la Tabla 4, así como en la sección de Bibliografía.

**Tabla 4. Listado de fuentes bibliográficas consultadas**

N°	Autor y título de la fuente bibliográfica en formato APA	Función principal en el presente trabajo
1.	(IPCC), I. P. (Available 2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers. <i>Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change.</i>	Antecedentes: El peligro del uso constante de los combustibles fósiles
2.	A.J. Appleby, G. C. (1978). High efficiency water electrolysis in alkaline solution. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , 21-37.	Marco teórico: Teoría acerca de las condiciones ideales para realizar la electrólisis del agua
3.	Abdin Z., W. C. (2015). Solar hydrogen energy hybrid energy systems for off-grid energy supply: a critical review. <i>Renew Sustain Energy</i> (52), 1791-1808.	Antecedentes: Señala la importancia de la falta de investigación en los métodos de producción de hidrógeno acoplados con tecnologías renovables.  Marco teórico: Señala que la pureza del hidrógeno obtenido mediante métodos acoplados con energías renovables supera el 90%.
4.	Alfredo Ursúa, L. M. (Febrero de 2012). Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. <i>Proceedings of the IEEE</i> , 2, 410-426.	Antecedentes: historia de la electrólisis  Diagramas de funcionamiento de la electrólisis alcalina
5.	Attila Gölle, P. G. (2015). Measurement based modeling and simulation of hydrogen generation cell in complex domestic renewable energy systems. <i>Journal Of Cleaner Production</i> (111), 17-24.	Marco teórico: Teoría acerca de la electrólisis del agua en celdas electrolíticas alcalinas  Diseño base para el reactor alcalino de celda seca

N°	Autor y título de la fuente bibliográfica en formato APA	Función principal en el presente trabajo
6.	Barbir, F. (2005). PEM Electrolys For Production Of Hydrogen From Renewable Energy Sources. <i>Solar Energy</i> (78), 661-669.	Antecedente: Descripción de la electrólisis del agua como el método más sencillo para la producción de hidrógeno
7.	Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. <i>Solar Energy</i> , 661-669.	Teoría: Comparaciones entre métodos para realizar la electrólisis del agua  Diagramas del funcionamiento de la electrólisis PEM
8.	C.E. Chamberlin, M. R. (2011). Comparison Of PV Module Performance Before And After 11 And 20 Years Of Field Exposure. <i>37th IEEE PV Specialists Conference</i> , 1-5.	Marco teórico: Durabilidad de un sistema de celdas fotovoltaicas en exposicion continua
9.	Cheremisinoff, N. P. (1996). <i>Materials Selection Deskbook</i> . New Jersey: Noyes Publications.	Selección de material para trabajar con hidrógeno
10.	Fatih Yilmaz, M. T. (2016). A review of solar based hydrogen production methods. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> (56), 171-178.	Antecedentes: Métodos de producción de hidrógeno adaptables a energía obtenida por medios fotovoltaicos.
11.	Goran Krajacic, R. M. (8 de Febrero de 2008). Hydrogen as an energy vector in the islands' energy supply. <i>International Journal Of Hydrogen Energy</i> , 33, 1091-1103.	Marco teórico: Definición del hidrógeno como vector energético
12.	Hale, A. J. (1919). <i>The Manufacture Of Chemicals By Electrolysis</i> . Londres: Orange Street.	Antecedentes: historia del a electrólisis
13.	Holladay JD, K. D. (2009). An overview of hydrogen production technologies. <i>Catalysis Today</i> , 244-260.	Antedente: Porcentajes de métodos de producción de hidrógeno en el toal de hidrógeno producido actualmente

N°	Autor y título de la fuente bibliográfica en formato APA	Función principal en el presente trabajo
14.	Ibrahim Dincer, C. A. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. <i>International Journal Of Hydrogen Energy</i> , 11094-11111.	Revisión de distintos métodos de producción de hidrógeno
15.	Ivy, J. (2004). <i>Summary of electrolytic hydrogen production: milestone completion report</i> . NREL/MP-560-36734.	Antecedentes: Percepción de la electrólisis en medios industriales
16.	J. Udagawa, P. A. (2007). Hydrogen production through steam electrolysis: Model-based steady state performance of a cathode-supported intermediate temperature solid oxide electrolysis cell. <i>Journal Of Power Sources</i> , 127-136.	Antecedentes: Descubrimientos recientes de la electrólisis
17.	James Larminie, A. D. (2003). <i>Fuell Cell Systems Explained</i> (1 ed.). Chichester, Inglaterra: Wiley Editorial.	Antecedentes: historia de la electrólisis
18.	Jan Pawel Stempien, Q. S. (2013). Solid Oxide Electrolyzer Cell Modeling: A Review. <i>Journal of Power Technologies</i> , 216-246.	Teoría: Comparaciones entre métodos para realizar la electrólisis del agua
19.	John C. Kotz, P. M. (2010). <i>Chemistry &amp; Chemical Reactivity</i> . USA: Brooks/Cole.	Marco teórico: Teoría básica de la electrólisis
20.	K. Mazloomi, N. b. (2012). Electrical Efficiency of Electrolytic Hydrogen Production. <i>International Journal of Electrochemical Science</i> , 3314-3326.	Marco teórico: Métodos de producción de hidrógeno
21.	K. Onda, T. K. (2004). Prediction of production power fro high-pressure hydrogen by high-pressure water electrolysis . <i>Journal Of Power Sources</i> , 64-70.	Antecedentes: Métodos de producción de hidrógeno
22.	K.C. Sandeep, S. K. (2017). Experimental studies and modeling of advanced alkaline water electrolyser with porous nickel electrodes for hydrogen production. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , 12094-12103.	Teoría: Comparaciones entre métodos para realizar la electrólisis del agua
23.	Kapdan I.K., K. F. (2006). Bio-hydrogen production from waste materials. <i>Enzyme and Microbial Technology</i> , 569-582.	Información acerca de los métodos biológicos para la producción de hidrógeno
24.	Lehner, T. S. (2014). <i>Power-to-gas: Technology and Business Models</i> . London: Springer.	Antecedentes: Usos modernos del hidrógeno

N°	Autor y título de la fuente bibliográfica en formato APA	Función principal en el presente trabajo
		Antecedente: El hidrógeno en la industria moderna, antecedentes históricos de la electrólisis
25.	Marié-Cecile Pera, D. H. (2013). <i>Electrochemical Components</i> . Gran Bretaña: Wiley.	Marco teórico: Principios básicos de electroquímica, revisión de distintos métodos de producción de hidrógeno  Antecedente: el hidrógeno como elemento en el planeta Tierra, historia de la electrólisis
26.	Md Mamoon Rashid, M. K. (Febrero de 2015). Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis. <i>International Journal of Engineering and Advanced Technology</i> , 4(3), 80-93.	Marco teórico: Otros usos de la electrólisis  Antecedentes: historia de la electrólisis
27.	N. Nagai, M. T. (2003). Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis. <i>International Journal Of Hydrogen Energy</i> , 35-41.	Marco teórico: Métodos de producción de hidrógeno
28.	O., S. (1899). <i>Alemania Patente n° 111,131</i> .	Antecedentes: historia de la electrólisis
29.	P. Millet, S. G. (2013). Water Electrolysis Technologies. <i>Renewable Hydrogen Technologies</i> , 19-41.	Marco teórico: Reacción que se lleva a cabo en la electrólisis
30.	P. P. Edwards, V. L. (1 de Febrero de 2007). Hydrogen Energy. <i>Philosophical Transactions Of The Royal Society</i> , 365, 1043-1056.	Marco teórico: Impacto ambiental de la electrólisis del agua
31.	R. Moliner, M. L. (2016). Analysis of the strategies for bridging the gap towards the Hydrogen Economy. <i>International Journal Of Hydrogen Energy</i> (41), 19500-19508.	Antecedentes: Información acerca del hidrógeno como vector energético

N°	Autor y título de la fuente bibliográfica en formato APA	Función principal en el presente trabajo
32.	R.L. LeRoy, C. B. (1980). The thermodynamics of aqueous water electrolysis. <i>Journal of the Electrochemical Society</i> , 1954-1962.	Antecedentes: Teoría acerca de la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua
33.	Rashmi Chaubey, S. S. (2013). A review on development of industrial processes and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and sustainable sources. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 23, 443-462.	Marco teórico: Revisión de distintos métodos de producción de hidrógeno
34.	Richards, J. (1901). <i>Journal of the Franklin Institute</i> .	Antecedentes: historia de la investigación del hidrógeno
35.	Schulte I., H. D. (2004). Issues affecting the acceptance of hydrogen fuel. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> (29), 677-685.	Comparación de distintos métodos de producción de hidrógeno y el impacto ambiental de cada uno
36.	Seyed Ehsan Hosseini, M. A. (2016). development, Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> (57), 850-866.	Antecedentes: Estado del arte de los métodos de producción de hidrógeno.
37.	Skakoon, J. G. (2008). <i>The elements of mechanical design</i> . New York: ASME.	Marco teórico: acerca del diseño mecánico
38.	V. M. Nikolic, G. S. (2010). Raising efficiency of hydrogen generation from alkaline water electrolysis - energy saving. <i>International Journal Of Hydrogen Energy</i> (35), 12369-12373.	Antecedentes: Descubrimientos recientes de la electrólisis
39.	Vignais P.M., C. A. (2004). Molecular biology of microbial hydrogenases. <i>Current issues in Molecular Biology</i> , 159-188.	Marco teórico: Información acerca de los métodos biológicos de producción de hidrógeno
40.	Winter, C.-J. (2009). Hydrogen energy - Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change. <i>International Journal Of Hydrngen Energy</i> (34).	Antecedentes: el hidrógeno como vector energético

N°	Autor y título de la fuente bibliográfica en formato APA	Función principal en el presente trabajo
41.	Zhang X.R., Y. H. (2010). Hydrogen production from solar energy powered supercritical cycle using carbon dioxide. <i>International Journal Of Hydrogen Energy</i> (35), 4925-4932 .	Antecedentes: Resalta la importancia de conjuntar tecnologías renovables con métodos de producción de electrólisis

## Resultados del Objetivo Específico 2

Una vez terminada la investigación de los antecedentes, se compararon y analizaron las diferentes tecnologías disponibles actualmente para los equipos que llevan a cabo procesos de electrólisis de agua, las cuales se encuentran brevemente explicadas en la sección de Antecedentes y Marco Teórico. Con esta información, se hizo un resumen de estas tecnologías y las respectivas ventajas y desventajas que presentan, las cuales pueden apreciarse en la Tabla 5.

**Tabla 5. Tecnologías disponibles para la producción de hidrógeno por medio de electrólisis del agua**

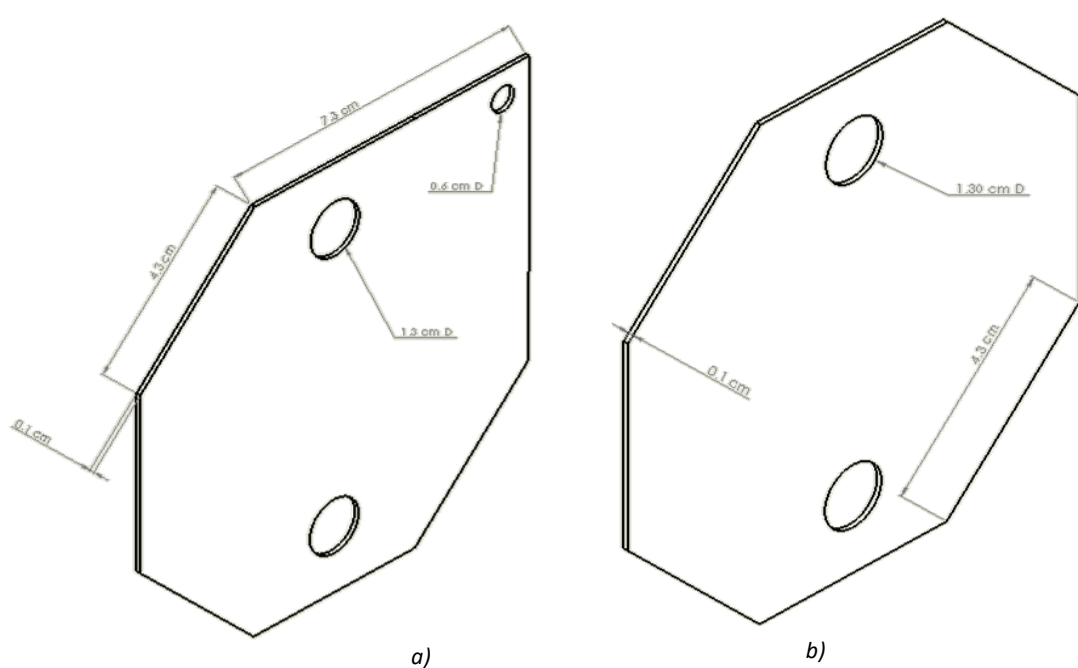
Tecnología	Ventajas	Desventajas
<b>Membrana de intercambio de protones (PEM)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pueden operar a presiones muy altas.</li> <li>• La pureza del hidrógeno obtenida por este método es la más alta de los electrolizadores disponibles (arriba del 99.99%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No existen muchas compañías que elaboren electrolizadores PEM</li> <li>• Tiempo de vida corto</li> <li>• Altos costos de inversión</li> </ul>
<b>Alcalina</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es la tecnología electrolítica de menor costo</li> <li>• La tecnología se encuentra comercialmente disponible</li> <li>• Procedimiento sencillo y ejecutable en condiciones atmosféricas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los costos de inversión son proporcionales a la producción deseada</li> <li>• La pureza del electrolito tiene un gran impacto en el hidrógeno producido</li> </ul>

Tecnología	Ventajas	Desventajas
<b>Óxido sólido (SO)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posee la eficiencia más alta de los electrolizadores disponibles</li> <li>• Se acopla perfectamente a fuentes de calor de altos niveles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesita materiales con alta estabilidad térmica</li> <li>• El hidrógeno producido usualmente conlleva vapor, por lo que necesita de equipo auxiliar</li> <li>• Su producción a larga escala no ha madurado lo suficiente</li> </ul>

Teniendo en cuenta esta información, que a partir de la simplicidad del proceso de electrolisis alcalina, el consumo energético bajo, así como las condiciones de operación atmosféricas, sin mencionar los costos elevados de las membranas PEM y la costosa síntesis de materiales especiales para SO, resultan en un camino más que evidente.

### Resultados del Objetivo Específico 3

Se diseñó un sistema modular para la producción de hidrógeno y oxígeno a partir de la electrólisis del agua, que consta de dos partes principales: los reactores electrolíticos de celda seca y el equipo modular. A continuación, se detallan los diseños en 3D producidos en este objetivo, así como sus respectivas mediciones.



**Figura 10. Diseño 3D de las placas de acero inoxidable del reactor electrolítico a) placa con carga b) placa neutral**



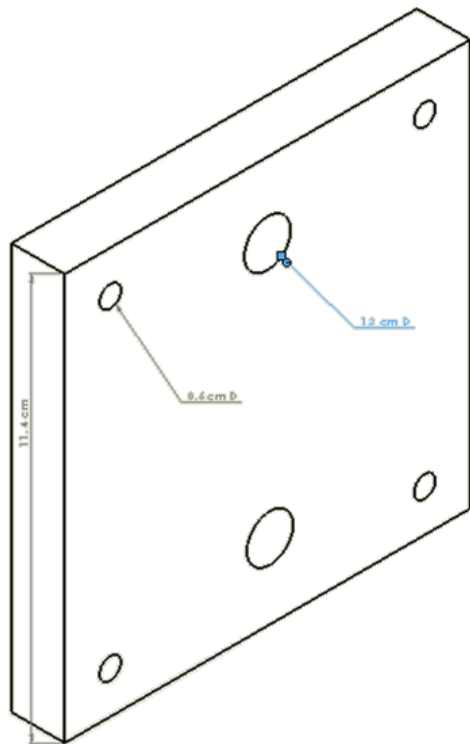


Figura 12. Diseño 3D de las placas de acrílico del reactor electrolítico

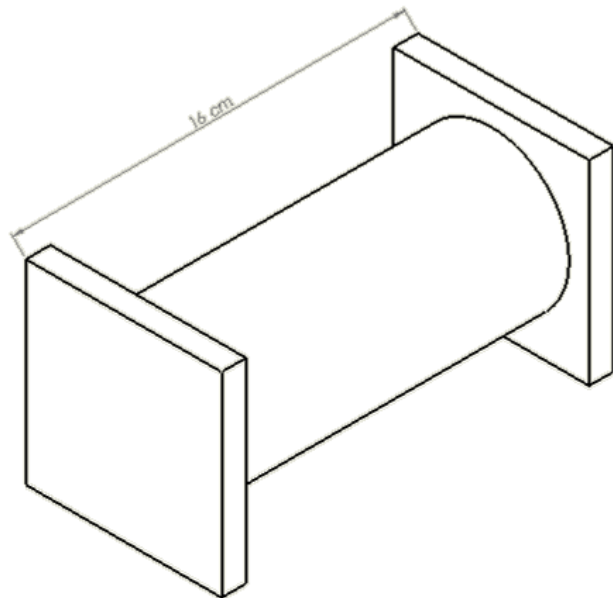


Figura 13. Diseño 3D del arrestador de flama hidáulico

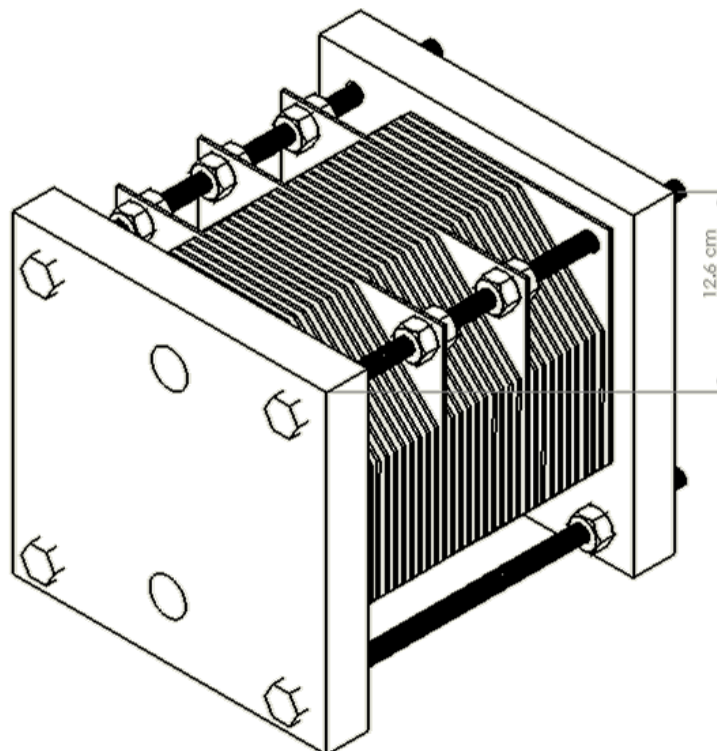


Figura 11. Diseño 3D de una configuración del reactor electrolítico

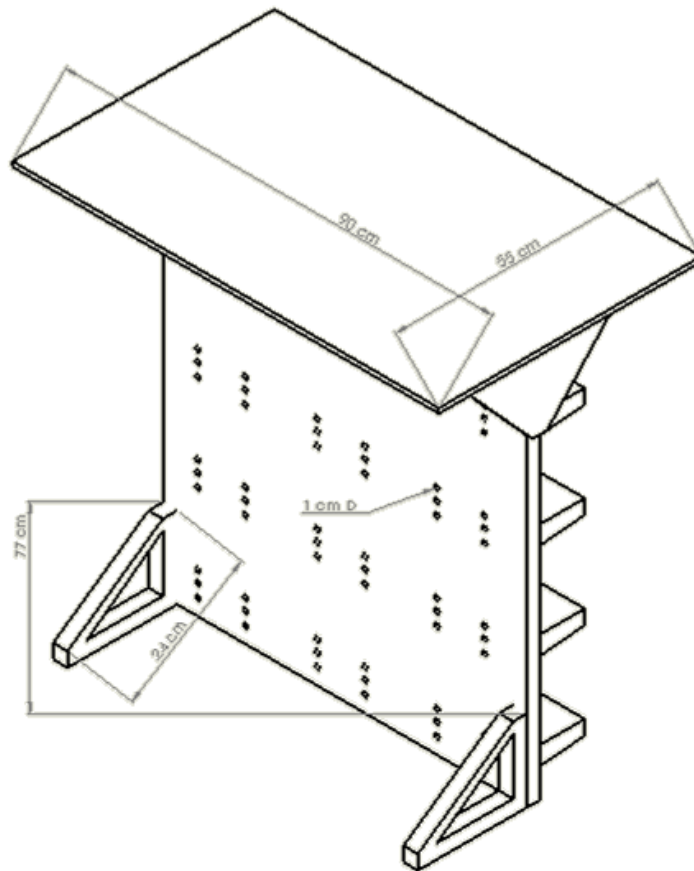


Figura 15. Diseño 3D del soporte para los reactores electrolíticos (vista posterior)

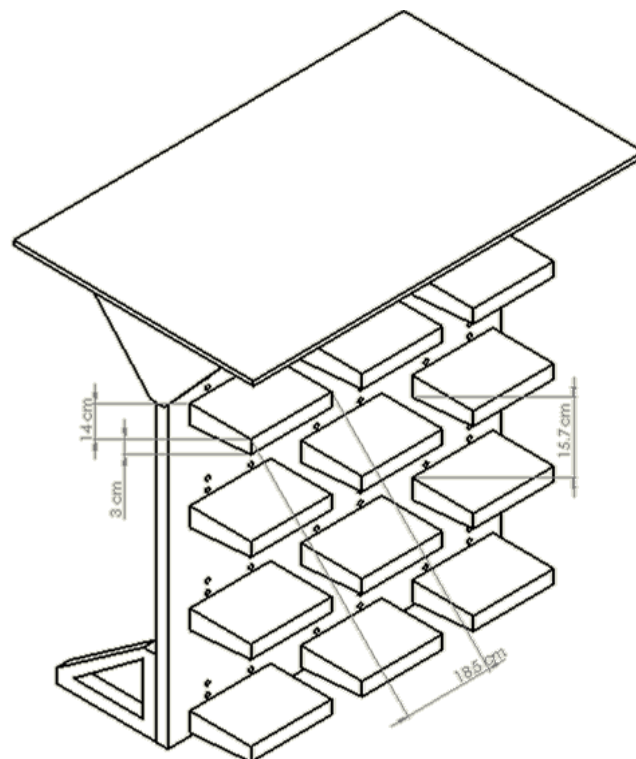


Figura 14. Diseño 3D del soporte para los reactores electrolíticos

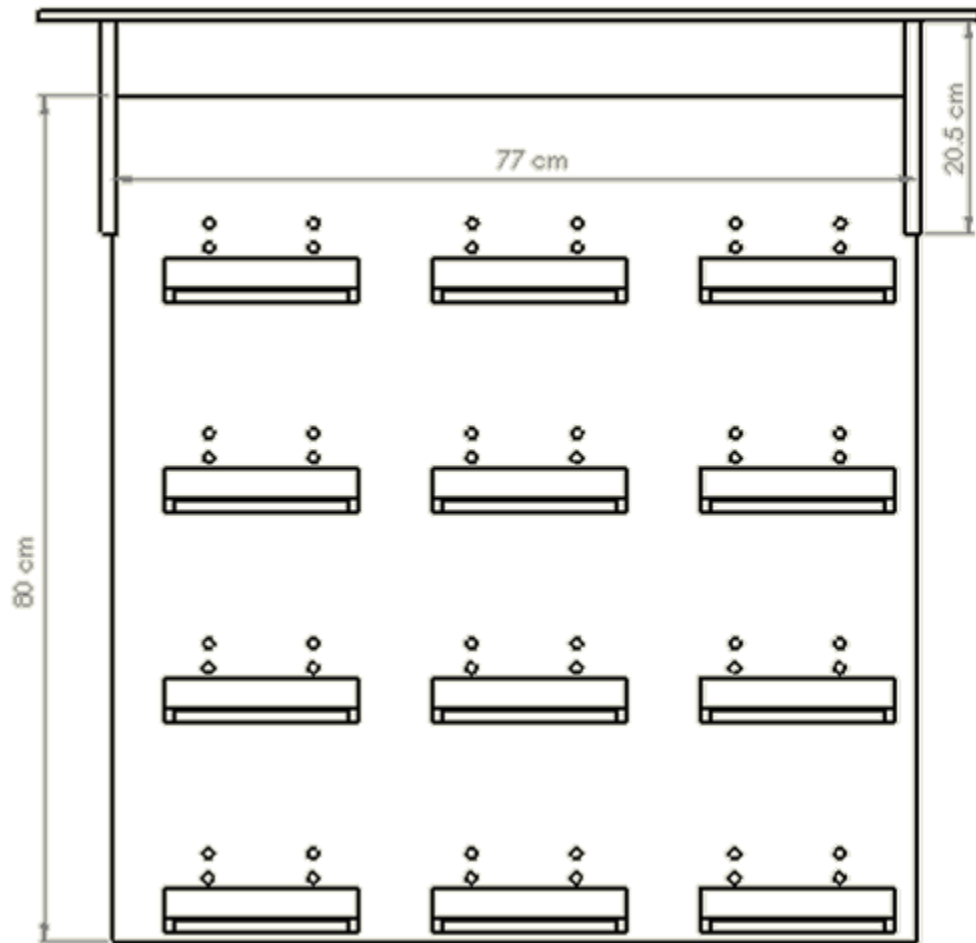


Figura 16. Diseño 3D del soporte para los reactores electrolíticos (vista frontal)

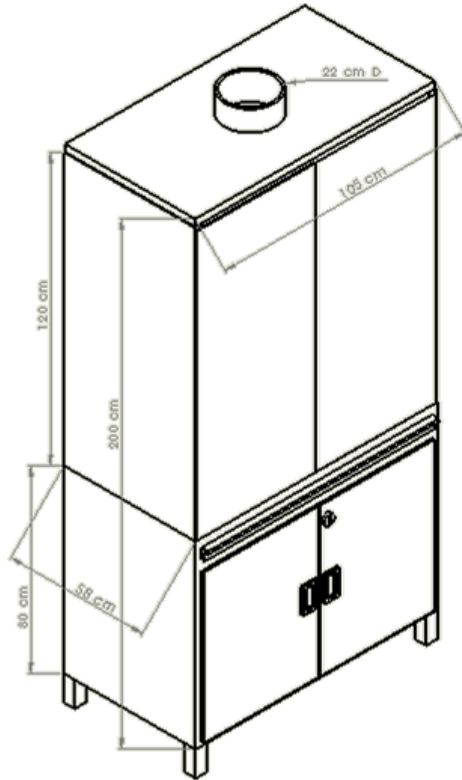


Figura 17. Diseño 3D del equipo modular de reacción

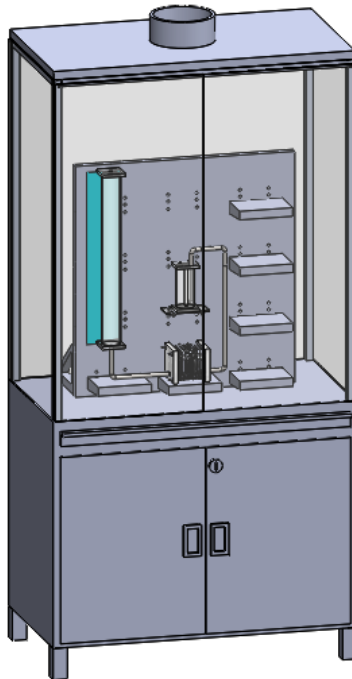


Figura 18. Diseño 3D del equipo modular de reacción con una configuración

#### Resultados del Objetivo Específico 4

Una vez que se concretaron los diseños en tercera dimensión, se realizó la búsqueda de un fabricante/proveedor que contara con un servicio de manufactura de equipo especializado de ingeniería con experiencia y respaldado por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (BUAP). Se contactó a la empresa AYSPEL, con la cual se mantuvieron sesiones de negociación, y se acordaron costos, fechas de entrega y sesiones de revisión de progreso, donde las piezas individuales fabricadas eran entregadas a nosotros previas a su aprobación para ser producidas en grandes cantidades. Se acordó la construcción del equipo modular de reacción y 10 reactores electrolíticos alcalinos de celda seca, los cuales fueron entregados en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP. A continuación se detallan imágenes de las piezas entregadas, así como de los accesorios que posteriormente fueron manufacturados o comprados por separado.

La sección superior se compone de un estante donde se colocan los reactores, puertas de acrílico en la parte frontal y trasera, una sección de ventilación en el caso de fuga de gas, así como distintos accesorios que pueden colocarse según sea necesario (arrestador de flama, entre otros) como se muestra en la Figura 19.

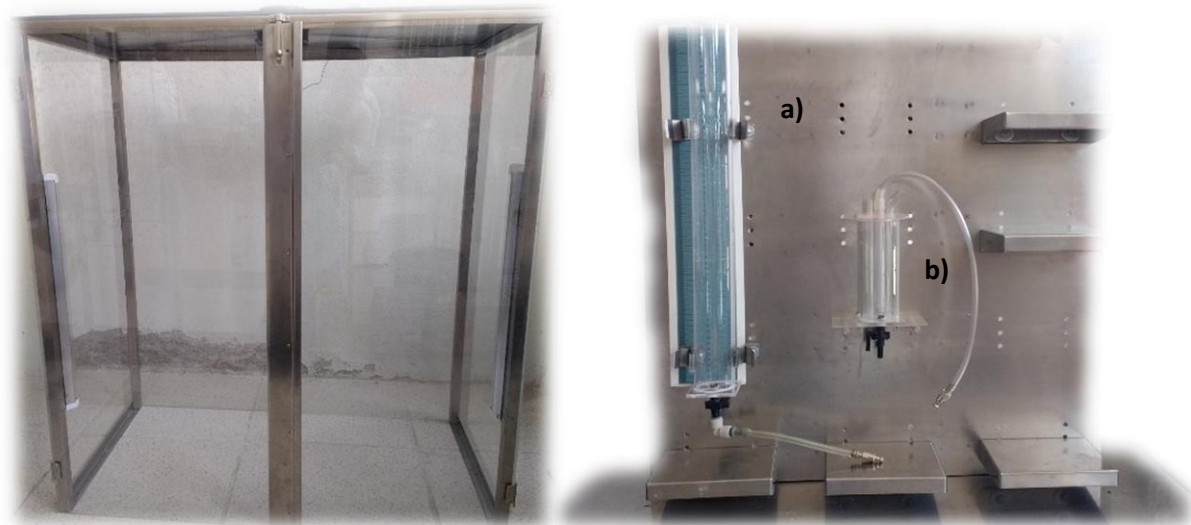


Figura 19. Componentes de la sección superior. La configuración propuesta en la imagen incluye a) tanque de almacenamiento del electrolito y b) arrestador de flama hidráulico



**Figura 20. Vista interior, exterior y acercamiento del sistema de ventilación, el cual posteriormente será programado para ser activado en caso de fuga del gas producido durante el proceso de electrólisis**



Figura 21. Soporte de la sección superior con una configuración que incluye 10 reactores electrolíticos

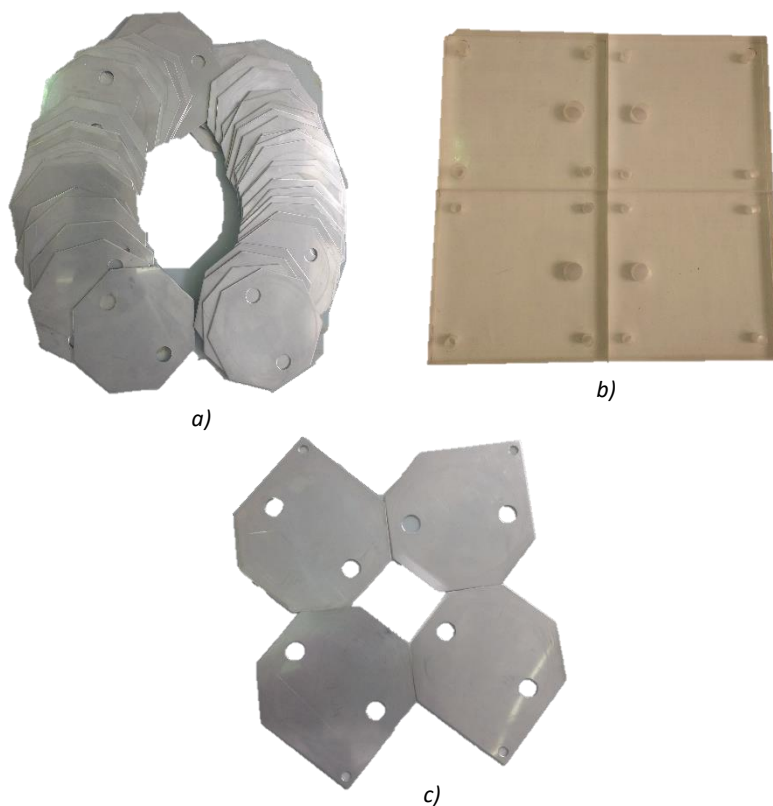


Figura 22. Sección inferior del equipo modular de reacción, la cual funciona como almacén de accesorios

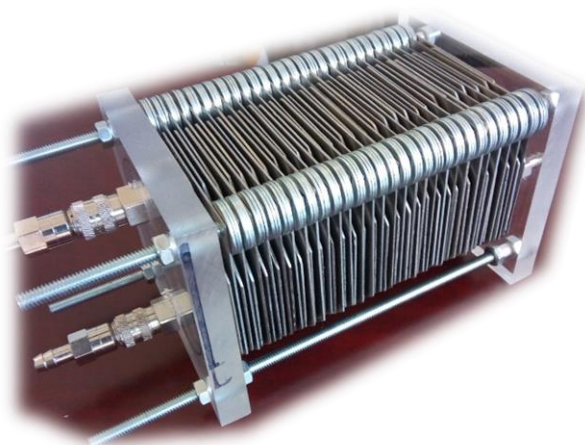
La sección inferior sirve como almacén y posee una bandeja deslizable de 100x35 cm, así

como un cerrojo para motivos de seguridad, como se muestra en la Figura 22.

La última sección consiste en las placas que, al ensamblarse, componen los reactores electrolíticos de celda seca. Todos los tipos de placas producidos en este trabajo, así como el reactor electrolítico ensamblado, pueden verse en la Figura 23 y la Figura 24.



**Figura 23. Componentes de los reactores electrolíticos de celda seca. a) Placas de acero inoxidable neutras, b) placas de acrílico, c) placas de acero inoxidable con carga**



**Figura 24. Propuesta de configuración del reactor electrolítico de celda seca**



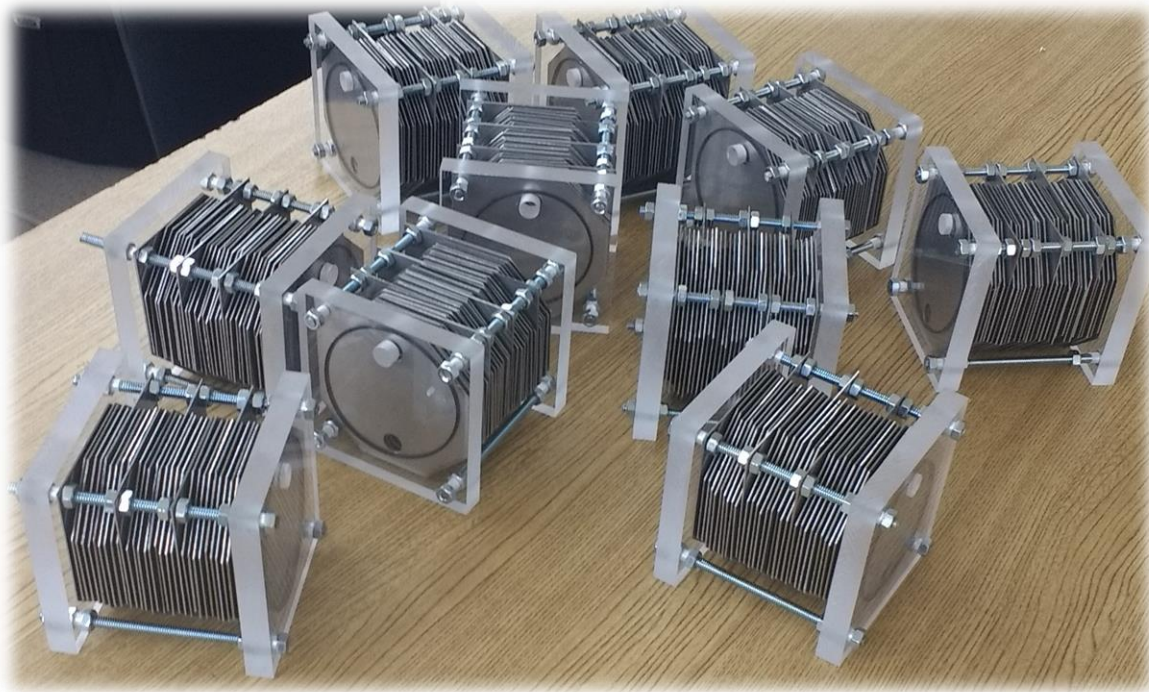


**Figura 25. Propuesta alternativa para la configuración de varios reactores electrolíticos de celda seca**

El reactor incluye las placas de acero inoxidable, los empaques que contienen al electrolito, las placas de acrílico en sus extremos y sus accesorios (válvulas, mangueras, etc.). Éstos pueden configurarse de la manera en que convenga al usuario, con un tiempo de armado de aproximadamente 20 minutos cada uno. Una de las configuraciones posibles se muestra en la Figura 25.

#### **Resultados del Objetivo Específico 4**

Se llevó a cabo el plan de trabajo para el diseño, se contactó a la empresa AYSPEL para la manufactura del equipo y se abordó un tiempo de construcción de aproximadamente dos meses, se realizaron sesiones de negociación en los cuales se entregaron los diseños en 3D, se acordó una nueva sesión en la cual se entregaron prototipos de las placas basados en los diseños, los cuales fueron aceptados. Una vez que se realizó la manufactura del equipo, se hizo la entrega del equipo modular (sección superior e inferior desensambladas) y los reactores electrolíticos ensamblados.



**Figura 26. Evidencia de la entrega de los reactores electrolíticos ensamblados**

### **. Resultados del Objetivo Específico 5**

Manual de usuario para el Equipo Modular de Reacción para la producción de Hidrógeno y Oxígeno

1. Verificar que los interruptores del equipo se encuentren en apagado previo a conectar a una fuente de poder.
2. Contar con al menos un reactor electrolítico ensamblado. La configuración del reactor varía conforme al a necesidad del usuario.
3. Verificar las conexiones entre el tanque de almacenamiento del electrolito, la entrada y salida del reactor electrolítico, y las conexiones de entrada y salida del arrestador de flama hidráulico.
4. Comenzar el llenado manual del tanque de almacenamiento electrolítico con la solución electrolítica, preferentemente con el doble de capacidad que puede almacenar el reactor electrolítico, lo cual dependerá de la configuración utilizada.

5. Abrir la válvula de llenado del reactor electrolítico ubicada en la parte inferior del tanque de almacenamiento electrolítico. Una vez que la solución electrolítica ha llenado por completo al reactor, cerrar la válvula.
6. Verificar la conexión entre la conexión desde la fuente de poder con los electrodos del reactor electrolítico.
7. Conectar el equipo a una conexión eléctrica comercial o a una conexión proveniente de paneles solares.
8. Monitorear continuamente el nivel de la solución electrolítica, abrir la válvula de llenado si el nivel de la solución dentro del reactor se agota más de la mitad de su volumen total.

# CONCLUSIONES

Se desarrolló un equipo modular a partir de diseño geométricos fundamentales, que posee la capacidad de producción de hidrogeno y oxígeno gas mediante una reacción de electrolisis alcalina, la cual puede ser alimentada por un suministro de energía comercial, así como un suministro energético proporcionado por energía solar, con un perfil de funcionamiento mínimo de 12V y 1 ampere en configuración directa, el fluido de trabajo propuesto es una solución electrolítica cuyos componentes son agua en un porcentaje dominante, más una sal de electrolito.

Para la alimentación del fluido electrolítico se diseñó un tanque de alimentación de acrílico provisto de accesorios típicos, tales como válvulas, mangueras, entre otros, esto permitirá suministrar el electrolito a los reactores en las diferentes configuración que el equipo puede adoptar. Las probables configuraciones del sistema abarcan desde un mínimo de un reactor electrolítico de celda seca compuesto de dos placas con cargas opuestas y un máximo de doce reactores electrolíticos de celda seca compuestos de 30 placas alternando entre placas con carga y placas neutras, de nuevo, de acuerdo a la conveniencia del usuario.

La producción de hidrogeno sucede casi de manera instantánea una vez que es aplicado el potencial eléctrico al sistema de reacción a través de los electrodos sin embargo a pesar del nivel de hermeticidad que pudiera asegurar el usuario, existe la posibilidad de fuga debido a la naturaleza misma del hidrógeno producido, incluso mezclado con el oxígeno.

Los resultados experimentales de producción y sus características podrían ser usadas para llevar a cabo simulaciones más acertadas durante el proceso y la metodología empleada puede aplicarse en otros procesos de separación electroquímica tales como electrolisis de celda húmeda, u otro tipo de electrolisis como PEM o SO.

Los diseños obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo permiten la gestión para la construcción y reproducción del equipo de estudio. El impacto de considerar o no la variabilidad de potencia relacionada al suministro dependiente de celdas solares en la simulación del proceso de electrolisis repercuten principalmente en la correspondencia física de la producción en caso de efectuarse la simulación.

Finalmente a partir de los resultados y conclusiones parciales se puede concluir que se cumplieron cabalmente con los objetivos planteados en este trabajo de tesis.

## BIBLIOGRAFÍA

- (IPCC), I. P. (Available 2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers. *Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change*.
- A.J. Appleby, G. C. (1978). High efficiency water electrolysis in alkaline solution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 21-37.
- Abdin Z., W. C. (2015). Solar hydrogen energy hybrid energy systems for off-grid energy supply: a critical review. *Renew Sustain Energy*(52), 1791-1808.
- Alfredo Ursúa, L. M. (Febrero de 2012). Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of the IEEE*, 2, 410-426.
- Attila Gölle, P. G. (2015). Measurement based modeling and simulation of hydrogen generation cell in complex domestic renewable energy systems. *Journal Of Cleaner Production*(111), 17-24.
- Barbir, F. (2005). PEM Electrolysis For Production Of Hydrogen From Renewable Energy Sources. *Solar Energy*(78), 661-669.
- Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy*, 661-669.
- C.E. Chamberlin, M. R. (2011). Comparison Of PV Module Performance Before And After 11 And 20 Years Of Field Exposure. *37th IEEE PV Specialists Conference*, 1-5.
- Cheremisinoff, N. P. (1996). *Materials Selection Deskbook*. New Jersey: Noyes Publications.
- Christodoulou C.N., K. G. (2004). A Review on Water Electrolysis. *TCJST*, 41-71.
- Fatih Yilmaz, M. T. (2016). A review of solar based hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(56), 171-178.
- Goran Krajacic, R. M. (8 de Febrero de 2008). Hydrogen as an energy vector in the islands' energy supply. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 33, 1091-1103.
- Hale, A. J. (1919). *The Manufacture Of Chemicals By Electrolysis*. Londres: Orange Street.
- Holladay JD, K. D. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 244-260.
- Ibrahim Dincer, C. A. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 11094-11111.

- Ivy, J. (2004). *Summary of electrolytic hydrogen production: milestone completion report*. NREL/MP-560-36734.
- J. Udagawa, P. A. (2007). Hydrogen production through steam electrolysis: Model-based steady state performance of a cathode-supported intermediate temperature solid oxide electrolysis cell. *Journal Of Power Sources*, 127-136.
- James Larminie, A. D. (2003). *Fuell Cell Systems Explained* (1 ed.). Chichester, Inglaterra: Wiley Editorial.
- Jan Pawel Stempien, Q. S. (2013). Solid Oxide Electrolyzer Cell Modeling: A Review. *Journal of Power Technologies*, 216-246.
- John C. Kotz, P. M. (2010). *Chemistry & Chemical Reactivity*. USA: Brooks/Cole.
- K. Mazloomi, N. b. (2012). Electrical Efficiency of Electrolytic Hydrogen Production. *International Journal of Electrochemical Science*, 3314-3326.
- K. Onda, T. K. (2004). Prediction of production power fro high-pressure hydrogen by high-pressure water electrolysis . *Journal Of Power Sources*, 64-70.
- K.C. Sandeep, S. K. (2017). Experimental studies and modeling of advanced alkaline water electrolyser with porous nickel electrodes for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 12094-12103.
- Kapdan I.K., K. F. (2006). Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 569-582.
- Lehner, T. S. (2014). *Power-to-gas: Technology and Business Models*. London: Springer.
- M. Lehner, R. T. (2014). *Power-to-Gas: Technology and Business Models*. Springer International Publishing.
- Marié-Cecile Pera, D. H. (2013). *Electrochemical Components*. Gran Bretaña: Wiley.
- Md Mamoon Rashid, M. K. (Febrero de 2015). Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 4(3), 80-93.
- N. Nagai, M. T. (2003). Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 35-41.
- O., S. (1899). *Alemania Patente nº 111,131*.
- P. Millet, S. G. (2013). Water Electrolysis Technologies. *Renewable Hydrogen Technologies*, 19-41.

- P. P. Edwards, V. L. (1 de Febrero de 2007). Hydrogen Energy. *Philosophical Transactions Of The Royal Society*, 365, 1043-1056.
- R. Moliner, M. L. (2016). Analysis of the strategies for bridging the gap towards the Hydrogen Economy. *International Journal Of Hydrogen Energy*(41), 19500-19508.
- R.L. LeRoy, C. B. (1980). The thermodynamics of aqueous water electrolysis. *Journal of the Electrochemical Society*, 1954-1962.
- Rashmi Chaubey, S. S. (2013). A review on development of industrial processes and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and sustainable sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 443-462.
- Richards, J. (1901). *Journal of the Franklin Institute*.
- Schulte I., H. D. (2004). Issues affecting the acceptance of hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*(29), 677-685.
- Seyed Ehsan Hosseini, M. A. (2016). development, Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(57), 850-866.
- Skakoon, J. G. (2008). *The elements of mechanical design*. New York: ASME.
- V. M. Nikolic, G. S. (2010). Raising efficiency of hydrogen generation from alkaline water electrolysis - energy saving. *International Journal Of Hydrogen Energy*(35), 12369-12373.
- Vignais P.M., C. A. (2004). Molecular biology of microbial hydrogenases. *Current issues in Molecular Biology*, 159-188.
- Winter, C.-J. (2009). Hydrogen energy - Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change. *International Journal Of Hydrogen Energy*(34).
- Zhang X.R., Y. H. (2010). Hydrogen production from solar energy powered supercritical cycle using carbon dioxide. *International Journal Of Hydrogen Energy*(35), 4925-4932 |.