



U

P

T

Universidad Politécnica de Tulancingo

# CARACTERIZACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO

por

José Francisco de la Fuente Colín

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de

Maestría en Energías Renovables

Supervisada por:

M. en C. Aldo Yuck Franco

Tulancingo de Bravo, Hidalgo

Agosto 2019

©UPT 2017

Derechos reservados

El autor otorga a UPT el permiso de reproducir  
y distribuir copias de este reporte en su totalidad  
o en partes.



## RESUMEN

En este trabajo de investigación se caracteriza, un generador de hidrógeno (GH2) para lograr un sustituto energético de algunos combustibles utilizados en el transporte público. Los componentes de este GH2, fueron manipulados en las instalaciones de nuestra casa de estudios, *La Universidad Politécnica de Tulancingo*(UPT), se realizaron pruebas en dos diferentes tipos de acero, con posibilidades de generar hidrógeno, se propusieron tres diferentes configuraciones con respecto al número de placas de acero para el GH2, realizadas en condiciones similares, se obtuvo gas H<sub>2</sub> (hidrógeno), realizando pruebas mecánicas y físicas, como en motores de combustión interna y sometida a pruebas explosivas. Como parte de la caracterización de este GH2, se hicieron una serie de tablas, imágenes, y gráficas que verifican las cantidades de producción de gas hidrógeno y desempeño del GH2, sus dimensiones y materiales que la condescienden se apegaron a los modelos establecidos en la bibliografía disponible, con la finalidad de su reproducción. En los laboratorios de la UPT, fue realizada una espectroscopia para los productos obtenidos del GH2, logrando resultados que verifican la presencia del gas hidrógeno comparada con resultados obtenidos en experimentos ya publicados anteriores y métodos establecidos ya conocidos.

En el capítulo I,

Se hace una senda por la historia y las propiedades energéticas que hacen del hidrógeno una posibilidad real para uso práctico, además de que se evidencian las razones que explican su éxito y que no se utiliza en forma general, como una alternativa real en nuestra actualidad, reconociendo los diferentes métodos que permiten su obtención, métodos como los llamados: electrolisis, reformado, gasificación, etcétera, por citar algunos, son los más conocidos, debido a factor económicos, medioambientales, tecnológicos y hasta de tipo político-sociales, en su aplicación y uso.

Se presentan una serie de figuras, tablas e imágenes, que explican las cualidades y propiedades generales que hacen del hidrógeno una alternativa viable, que permiten pensar y reflexionar del porque este energético debe y/o debería ser de uso común.

En el capítulo II,

Se propone la caracterización, funcionamiento, y generación de gas H<sub>2</sub>, basado mediante la aplicación del método científico y en los términos que se refieren: observación, hipótesis, experimentación, resultados y conclusiones. Realizando pruebas con dos tipos de acero, por un lado, acero estructural A-53 y por otro acero inoxidable calibre No. 24, pues por los minerales que los componen se presume que existe una posibilidad para su aprovechamiento en este sistema de generación energética.

Por otro lado, con sus materiales, haciendo incrementar el número de placas de acero de ambos tipos, logrando resultados gracias a la realización de estadística práctica concebida por los autores de este trabajo de investigación, que permiten observar el desempeño de generación del GH<sub>2</sub>, tanto de manera cuantitativa como cualitativa.

En el Capítulo III

En este capítulo con los datos hasta ahora acumulados, se hicieron tablas donde se muestran los volúmenes de gas hidrógeno obtenidos, se describen los equipos electrónicos utilizados para monitorear el funcionamiento del GH<sub>2</sub>, se obtiene gráficos donde se logra observar los rendimientos del generador y una espectroscopia donde se demostró la presencia de gas hidrógeno, durante el desarrollo experimental.

En el capítulo IV

Conclusiones

En las conclusiones se visualizan las posibilidades de utilizar el gas H<sub>2</sub> como complemento energético para el ahorro de los combustibles fósiles.

Se verifica la producción de gas hidrógeno en el ámbito académico, siendo una realidad confiable, segura y tangible, se observan en base a los resultados obtenidos en los capítulos los componentes que deberán utilizarse para obtención de un GH<sub>2</sub>, los voltajes (*V*) y amperajes (*A*) para los cuales este dispositivo de generación energética se comporta de una manera más estable, funcional y segura, en cuanto a la generación y funcionamiento del mismo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis Padres: Lic. L. Mario de la Fuente Melo <sup>+</sup> y Marcela Elvira Colín Urquijo, por ese esfuerzo para hacer de mí una persona de bien y trabajo, y que mediante su enseñanza de valores, hoy soy una persona libre.

A mi casa de estudios la *UNIVERSIDAD POLITÈCNICA DE TULANCINGO*, por permitirme realizar el trabajo de tesis en el posgrado de la Maestría en Energías Renovables, y el apoyo del sistema de becas en estos seis cuatrimestres intenso trabajo.

A mi asesor el Mtro. Aldo Yuck Franco, admirando su gran fortaleza interna e infinitas aptitudes y actitudes de enseñanza, por compartir sus conocimientos desinteresadamente con su servidor, muchas gracias.

A mi Esposa Ana Perla e Hijas Ana, Elena y Cristina que siempre están pendientes de mí persona, logros académicos y profesionales.

A la comunidad académica, estudiantil y sociedad en general,...

## **CONTENIDO**

### **CAPÍTULO I**

“Introducción”.....	7
I.1 Antecedentes.....	7
I.1.1 El Experimento de William Robert Grove.....	8
I.2 El hidrógeno en la actualidad.....	11
I.3 Características del hidrógeno.....	15
Objetivos Generales y específicos.....	18
Justificación.....	18

### **Capitulo II**

“El hidrógeno y el funcionamiento del GH <sub>2</sub> por el método electrolisis”.....	19
II.1 Electrolisis.....	19
II.2 Expectativas del H <sub>2</sub> .....	22
II.3 Producción del Hidrógeno.....	25

### **Capítulo III**

“Caracterización del generador de hidrógeno (GH <sub>2</sub> )”.....	28
III.1 La pregunta ¿Cómo generar hidrógeno? .....	28
III.2 Investigación y empirismo.....	28
III.3 La Hipótesis.....	29
III.4 Partes de un generador de hidrógeno.....	29
III.5 La Experimentación.....	31
III.5.1 La propuesta.....	31
III.5.2 Primera propuesta.....	32
III.5.3 Segunda propuesta.....	33

III.6 Procedimiento de fabricación del generador de hidrógeno.....	33
III.6.1 Experimentación en las propuestas 1° y 2°.....	35
III.6.1.1 Materiales.....	36
III.6.2.Propuesta 3°.....	38
III.6.3. Procedimiento de la propuesta en funcionamiento.....	39
III.6.4 Inspección del GH2 posterior al funcionamiento.....	51
III.6.5.Experimentación del GH2, con 19 placas de acero inoxidable.....	53
III.6.6. Caracterización del GH2, Voltaje y Amperaje.....	55
III.7. Espectroscopia del hidrógeno.....	59
III.8. Balance de potencia.....	61
Capítulo IV	
“Conclusiones y Trabajos Futuros”.....	64
Bibliografía.....	67
Referencias web.....	68

## Capítulo I

# Introducción

### I.1 Antecedentes

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, es el más ligero y abundante en el Universo, pues se considera que constituye el 75% de la masa del Universo y forma el 90% de sus moléculas.<sup>[1]</sup>

Debido a que en la tierra no se encuentra en forma natural sino al producirlos en ciertos procesos, esto es, apenas descrito por el alquimista “Paracelso” al verter Acido sobre hierro donde obtiene un gas inflamable, siglos después es descrito por Robert Boyle en 1671, donde describe como al hacer reaccionar acido sobre hierro se obtiene una sustancia inflamable, posteriormente Henry Cavendish en 1766 recoge sobre el mercurio un gas al que el describe como un aire inflamable y finalmente el químico francés Antonie Laurent Lavoisier le dio el nombre de hidrógeno en 1785, esto debido a una de las reacciones más frecuentes de este elemento al estar en presencia del oxígeno, este combustiona y además como desecho se obtiene agua.<sup>[2]</sup>

La primera vez que se observó y dio a conocer este fenómeno fue por el Gales William Grove en 1839. El proceso inicia con electrolisis donde se obtiene hidrógeno y oxígeno, posteriormente al detener la electrolisis las terminales en serie de platino reaccionaron con hidrógeno y oxígeno, obteniendo agua, electricidad y calor, el mezcló la moléculas antes descritas en presencia de un electrolito y produjo electricidad y agua.<sup>[2]</sup>

William Robert Grove (1811-1896) fue un juez y científico Galés. Anticipó la teoría general de la conservación de la energía, y fue un pionero de la tecnología de las células de combustible, inventó la célula voltaica de Grove, la cual utilizaremos como muestra en este trabajo de investigación.<sup>[2]</sup>

William Robert Grove realizó una visita al Continente Europeo, y en este momento Grove tuvo una oportunidad de volcarse en sus intereses científicos, plasmados en su primer artículo, en el que sugería algunas construcciones novedosas de células eléctricas.<sup>[2]</sup>

En 1839, W. R. Grove desarrolló un nuevo tipo de célula eléctrica, “la célula de Grove”, utilizando zinc y electrodos de platino expuestos a dos ácidos y separados por un material cerámico poroso, comunicando su desarrollo a la Academia de Ciencias en París en 1839, en 1840 Grove inventó una de las primeras luces eléctricas incandescentes, posteriormente perfeccionada por Thomas Edison, también presentó su invento ante la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia en Birmingham, donde despertó el interés de Michael Faraday, gracias a la invitación de Faraday, Grove presentó sus descubrimientos en los prestigiosos Discursos de los Viernes de la Royal Society en 1840.<sup>[2]</sup>

La presentación en la Sociedad Royal en Inglaterra, acrecentó su reputación, siendo propuesto para su elección como miembro de esta por William Thomas Brande, William Snow Harris y Charles Wheatstone, también suscitó la atención de John Peter Gassiot, una relación que se tradujo en que Grove se convirtió en el primer profesor de filosofía experimental en la London Institution en 1841, su disertación inaugural en 1842 fue el primer anuncio de lo que Grove llamó la correlación de fuerzas físicas (en términos actuales, el principio de la conservación de la energía).<sup>[2]</sup>

En 1842 desarrolló la primera célula de combustible (a la que llamó batería voltaica de gas), capaz de producir energía eléctrica combinando hidrógeno y oxígeno, y describió su funcionamiento utilizando su teoría de la correlación, en el desarrollo de la célula demostró que el vapor podía ser dissociado en hidrógeno y oxígeno, y a su vez el proceso podía ser invertido, fue el primero en demostrar la disociación térmica de moléculas en sus átomos constituyentes.

Realizó la primera demostración de este efecto ante Gassiot y su editor científico Edward William Brayley en una sesión privada. Su trabajo también le llevó a formular ideas pioneras sobre la naturaleza de la ionización. Así mismo, es acreditado como el descubridor de la pulverización catódica.<sup>[3]</sup>

### **I.1.1 El Experimento de William Robert Grove <sup>[20]</sup>**

En 1839 William Robert Grove, publicó un experimento que demostraba la posibilidad de obtener electricidad a partir de la reacción electroquímica del hidrógeno y el oxígeno, para demostrarlo utilizó cuatro contenedores con aproximadamente la mitad de su capacidad ocupado este con una disolución de ácido sulfúrico y agua que actuaba como dieléctrico, en dos cavidades, una con oxígeno y otra con hidrógeno, dentro de cada una ellas introdujo un electrodo fabricado con platino.

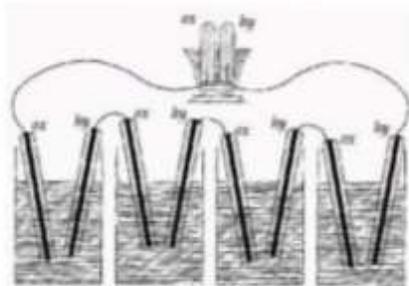
Las cavidades que se formaban entre las celdas las llenó por completo de la mezcla de ácido sulfúrico y agua y posteriormente las introdujo en los contenedores. Tras introducir hidrógeno y oxígeno en cada cavidad de cada contenedor tal y como muestra la [Figura 1], observó que durante un proceso electroquímico de oxidación y reducción, se producía una corriente eléctrica con una baja diferencia de potencial en cada una de ellas, por lo que las unió en serie y obtuvo una diferencia de potencial mayor.

Esa diferencia de potencial y con la corriente suministrada en el experimento, tomo la decisión de aplicarla a un quinto contenedor con dos electrodos de platino y la misma disolución como electrolito, pudiendo comprobar que se generaba en cada una de las cavidades del quinto contenedor, oxígeno e hidrógeno.

De las pruebas obtuvo que hiciera falta mucho más oxígeno e hidrógeno para alimentar la pila del que se obtenía con la energía que proporcionaba la misma. Aparentemente estas pruebas no tenían ninguna aplicación energética, pero sin aún saberlo había abierto el campo de investigación sobre las pilas de combustible.

## Caracterización y funcionamiento de un generador de Hidrógeno

En principio el experimento era una mera curiosidad sin ninguna aplicación práctica, al fin y al cabo, se necesitaba mucha energía para producir hidrógeno y oxígeno, (con 4 contenedores, tan solo se podía recuperar una de ellas después de todo el proceso).



[Figura 1] imagen del experimento de W.R. Grove <sup>[20]</sup>

En 1842 Grove, (Ver [Figura 2]) se dio cuenta que tan solo se producía la reacción electroquímica en una fina capa de solución ácida sobre el electrodo. <sup>[20]</sup>

Al principio del experimento, se medía con un galvanómetro un flujo de electrones entre los electrodos que iba descendiendo poco a poco, si se quería restituir la reacción había que restituir la capa de electrolito, por lo que dedujo que la reacción dependía de la superficie activa. <sup>[20]</sup>

Para aumentar la superficie, utilizó electrodos de platino sólido con partículas de platino depositadas, además amplió el número de celdas a 26 conectándolas de la misma manera que en el experimento original. <sup>[20]</sup>

Experimentando probó introducir distintos gases en las probetas y en uno de los experimentos observó que la combinación del oxígeno con el nitrógeno producía un pequeño efecto, debido al oxígeno del aire que había disuelto en el electrolito. <sup>[20]</sup>

En 1843 intentó demostrar su teoría de que el oxígeno era el que contribuía a la reacción química. Continuó con los experimentos probando otras 14 combinaciones de gases, llegando a la conclusión de que el cloro y el oxígeno, alimentando a uno de los electrodos y el hidrógeno y el monóxido de carbono alimentando al otro electrodo, son los únicos gases capaces de combinarse electrosintáticamente y producir corriente eléctrica. <sup>[20]</sup>

Debido a la selectividad de la batería de gas respecto al oxígeno, propuso una utilidad práctica de la pila para determinar la composición volumétrica de una mezcla gaseosa, particularmente la pureza del aire. <sup>[20]</sup>

Tras todos estos experimentos, en 1845 fue cuando W. R. Grove propuso que su batería de gas podría ser una fuente de electricidad a partir de combustibles convencionales. <sup>[20]</sup>



[Figura 2] Imagen de Sir William Robert Grove (1811-1896) <sup>[20]</sup>

Ludwig Mond y Charles Langer utilizaron por primera vez el término "pila de combustible" para referirse a este tipo de dispositivos. En 1889, estos dos científicos realizaron un gran avance, resolviendo el problema asociado a la inmersión de los electrodos en el electrolito líquido y por tanto, a la dificultad del acceso de los gases reactivos a los puntos activos, su prototipo permitía retener el electrolito en una matriz sólida no conductora, cuya superficie estaba cubierta por una fina capa de Platino u Oro. <sup>[3]</sup>

Otra fuente<sup>[4]</sup> indica que William White Jaques fue el que primero acuñó el término "celda de combustible", Jaques fue también el primer investigador en utilizar el ácido fosfórico como electrolito.

Las investigaciones sobre la celda de hidrógeno (CH) en la Alemania de los años 20 abrieron la vía al desarrollo de las celdas sólidas de combustible de hoy. <sup>[4]</sup>

Durante años posteriores se realizaron intentos por mejorar este modelo sin mucho éxito y además pasarían muchos años para que la investigación se reanudara, esta vez por Francis T. Bacon en 1959, el mejoro el diseño de los catalizadores de platino, el ácido sulfúrico como electrolito y además de usar electrodos de níquel, con lo cual se abarato el sistema. <sup>[4]</sup>

Posteriormente durante los finales de la década de los 60's y los 70's, la N.A.S.A. selecciona este sistema de energía para alimentar las misiones Geminis y Apollo, posteriormente las misiones Apollo-Soyuz, Skylab y transbordador. <sup>[4]</sup>

En 1993 surgen los primeros autobuses, a partir de este momento, existen diferentes empresas automotrices que empiezan a trabajar en autobuses y automóviles impulsados por celdas de combustibles, con mejorías notorias entre cada nueva generación de estas. <sup>[4]</sup>

## **I.2 El Hidrógeno en la actualidad**

Es sabido hoy en la actualidad que se utilizan varias alternativas energéticas, por ejemplo, es muy conocido hoy, que la energía eólica es una alternativas de generación que logra en ciertas condiciones eficiencias aceptables de tal manera que definitivamente lo aceptamos como una verdad, es una realidad, no vamos muy lejos en esta casa de estudios la *Universidad Politécnica de Tulancingo*, existe un parque a base de 5 aerogeneradores, cuya operación, y funcionalidad son una realidad, pues ya están en operación, proporcionando una respuesta ecológica, limpia, eficiente y funcional, digamos que es una manera amigable con el medio ambiente lo que la hace sustentable, pues el viento no produce contaminante alguno, y la energía que transforma las palas del rotor producto de accionar del viento sobre estas, generando energía eléctrica que hace posible el funcionamiento de muchos equipos eléctricos y electrónicos.

Por ejemplo, el Ing. Octavio Andrés González Estrada de la Universidad Industrial de Santander utilizo en sus trabajos para Doctorado con la aplicación del agua ( $H_2O$ ) y mediante la electrólisis, una solución a la obtención del hidrógeno como una alternativa energética para lograr una disminución de emisión de gases tóxicos al ambiente y un notable ahorro de combustibles hidrocarburoados en motores a combustión interna.

En ese trabajo se investigan los beneficios potenciales del  $H_2O$ , mezclado con combustibles fósiles, describe el diseño de un sistema con celda electrolítica caracterizando su desempeño en un motor a gasolina de 100 cc. <sup>[5]</sup>

Por otra parte en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, se desarrolla una variante de celda de combustible que tiene un funcionamiento similar al desarrollado en esta tesis, la diferencia entre este proyecto y el desarrollado en esta tesis, es que se utiliza membrana de Nafion 117, el cual presenta un funcionamiento óptimo con respecto a su aprovechamiento y rendimiento con fines eléctricos, cabe resaltar que este proyecto utiliza el gas hidrógeno como combustible para generar energía eléctrica, por otra parte, en este trabajo de investigación se pretende producir gas hidrógeno en aras de lograr una alternativa que de ser posible logre sustituir a los combustibles convencionales que a veces son utilizados para producir energía eléctrica. <sup>[6]</sup>

De igual manera Ulises Cano Castillo, Leonardo Rejón García y Mirna Ojeda Hernández, publicaron un boletín en el año 2010, donde básicamente se muestra un panorama completo de las posibilidades de uso desde un punto de vista costo-beneficio, además de otros aspectos importante “tangibles”, pues se observan los materiales de uso físico que son necesarios para su producción, almacenamiento, uso efectivo en tanto le sean investigados, tales como uso habitacional, comercial e industrial, y toca un punto muy interesante, relata las posibilidades de generación que tiene la paraestatal PEMEX, pues le es posible generar este gas ( $H_2$ ) por un método de producción llamado, “Reformación de gas natural con vapor de agua”, es evidente para las políticas actuales de consumo al respecto de los energéticos disponibles, disponen de tendencia hacia otros energéticos, pues incluso en los procesos que sigue esta paraestatal se quema el gas natural de manera masiva pues su producción es de varios millones de metro cúbicos al año, pensando en las bondades que proporcionan esta alternativa energética, esto hace pensar que el cambio hacia el uso del gas hidrógeno están muy lejos y con pocas posibilidades de aplicación en el corto plazo. <sup>[7]</sup>

Otra referencia que resulta interesante debido al análisis que hace el Sr. Teodoro Sánchez Campos, Gerente de programa del Departamento de Energía, Infraestructura y Servicios básicos, en el Perú.

En su artículo hace una visible y ya urgente necesidad de utilizar este energético como sustituto de los energéticos tradicionales, tales como los fósiles, esto se observa necesario ya en todas las zonas urbanas, como suburbanas y como una solución en las zonas rurales, esto debido a la notable carencia de servicios en este sector, es una posibilidad de aplicación tangible, tanto aplicable a nivel de servicios como de uso doméstico, pues su potencial de aplicación es ya una realidad, no olvidemos que esta fuente de energía(hidrógeno) es una solución desde ya hace varios años, tenemos el claro ejemplo de la N.A.S.A., en el cual este energético fue el responsable de hacer posible la salida del planeta, para las misiones APOLO, o incluso, el uso de vehículo automotores(esto en la marca de BMW), pues ya existen hoy vehículos de transporte pesado, los cuales nos hacen un claro hincapié en las posibilidades de uso en este rublo. <sup>[8]</sup>

Otra referencia es aportada por el Sr. Francisco Acuña Garrido, de la Universidad del Norte en Barranquilla, Colombia, en su reporte analiza las posibilidades de utilizar la energía que guarda el hidrógeno, y lo observa como un energético que dará solución a los problemas que generan los motores a combustión interna, al respecto de sus emisiones contaminantes nocivas, como auditivos, y de saturación en cuanto a su uso, considera que las celdas de combustible evitan el ciclo de Carnot, o sea, sin generar calor que para las máquinas convencionales(combustible fósil) es parte inherente de su funcionamiento común, eso significa generar algún contaminante como el CO y otros. <sup>[9]</sup>

Por otra parte, miembros de la Universidad Nacional de la Plata en Argentina, específicamente del departamento de mecánica, como lo son la Dra. María Isabel Sosa y el Ing. Alberto Fushimi, realizan un análisis de funcionamiento de esta alternativa energética, en la cual hacen referencia de las ventajas que se obtiene al utilizar un generador GH2, como el que es desarrollado en la UPT, las ventajas que se obtiene son claramente una conversión directa de la energía(esto es sin generar combustión), la supervisión que se requiere es muy mínima, en este punto y en coincidencia con este trabajo de investigación demuestra que el GH2, es posible dejarla funcionar por horas y días sin supervisión, es un dispositivo muy confiable que no ha presentado hasta ahora problema alguno, simplemente es muy confiable su funcionamiento, lo que logra hacer una supervisión mínima.

Por otro lado en el trabajo de investigación aquí citado se menciona que la celda de combustible genera una cierta cantidad de ruido, lo que en el GH2 desarrollado en este trabajo de investigación, no se escucha ruido alguno, menciona que el electrolito utilizado no se agota, en nuestro caso el electrolito o agua que utilizamos no requiere recarga siempre que no se presenten perdidas por concepto de fugas a consecuencia de sello y expulsiones por la manguera conductora de gas hidrógeno, coincidimos en los escasos o nulos impactos ambientales que genera este dispositivo de generación energética los productos de residuo son agua(H<sub>2</sub>O), son otra ventaja que se demuestra para el GH2 y debido a la naturaleza de su construcción resulta en un dispositivo modular la cual ofrece la ventaja de crecimiento lo que lo hace adaptarse a las necesidades según los requerimientos a solventar.

Es evidente que las ventajas de utilizar este dispositivo de generación de hidrógeno (GH<sub>2</sub>), son ya muy probadas y todavía poco aprovechadas, es una necesidad ya importante, la implementación de esta dispositivo de generación energética en la actualidad. No es razonable que haya sido descubierto a más de un siglo de distancia y todavía se mencione como un tema académico o científico, ajeno a la vida cotidiana, que dispone de una gama de alternativas para solventar problemáticas específicas, pues ya las problemáticas que vivimos debido al uso de nuestros energéticos, rebasan en mucho los beneficios obtenidos y los procesos de mitigación de estos impactos, los cuales simplemente no logran el equilibrio, para hacernos vivir en un medio ambiente sustentable, promovido por nosotros mismos. <sup>[10]</sup>

Por otra parte en el año 2010 la organización internacional llamada “La red de hidrógeno” CYTED, con presencia en Iberoamérica, realiza una convocatoria con el objetivo de reunir a más de 200 investigadores de diferentes nacionalidades, tales como España, Brasil y Argentina por darle un orden a los involucrados, la finalidad de esta convocatoria es fortalecer el conocimiento conjunto sobre las alternativas ya conocidas al respecto de los procesos de obtención y las formas de utilizar el gas hidrógeno respectivamente, producido por todos los países y comunidades científicas involucradas. Una vez concluidos y alcanzados los objetivos de la convocatoria, los involucrados llegan a coincidir que las alternativas disponibles que ofrece el hidrógeno como vector de energético son, si bien es cierto no es una alternativa actual, es claramente una solución futura, pues el petróleo y el carbón gozan de varias décadas y hasta siglos de vida útil para su aprovechamiento todavía, se concluye, a juicio de los participantes, “las dificultades técnicas para las fuentes móviles no están aún resueltas ya que solo existen como combustibles alternativos el etanol y el biodiesel, cuyo empleo podría generar conflictos por el uso extensivo en la tierra”, esta afirmación se genera por la disponibilidad de cultivar la materia prima que permite obtener estas alternativas energéticas. <sup>[11]</sup>

Las conclusiones a las que llegan los involucrados en esta cita científica son particularmente diferentes debido a los puntos de vista y en menos a los participantes latinoamericanos, pues si bien es cierto que las instituciones académicas disponen de una excelente comunicación por diferentes medios, estos no aportaron en mayor medida a su participación, con esto es claro que las fallas en comunicación siguen siendo una limitante en el desarrollo intrínseco de las naciones. <sup>[11]</sup>

En esta publicación científica resulta curioso que una de las conclusiones sean textualmente dicho, “que el hidrogeno no es todavía una opción energética”, pues seguimos disponiendo por muchos años de energéticos como el carbón y biodiesel, está bien si se permite el termino, pero lo que sí es una clara urgencia ya es el impacto ambiental que estamos sufriendo pues la presencia de los efectos climáticos ya está cobrando facturas muy altas, los habitantes de este planta ya sufren día a día sus efectos adversos que si bien es cierto que los seres vivos se adaptan a la clima, muchas especies no lo logran en el inmediato o corto plazo. <sup>[11]</sup>

En el año 2010 el pasante de ingeniería técnica naval en propulsión y servicios del buque, de la Facultad Náutica de España, Héctor Holgado Secas, presento su tesis para titulación, con el nombre “Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrógeno por electrolisis” ,El objetivo de este proyecto es estudiar y diseñar un generador de hidrógeno, no para la producción en cantidades industriales, sino pequeñas dimensiones y por ende de producción reducida, para la aplicación en motores de combustión interna.

Este trabajo de investigación llegará a la obtención del generador de gas hidrógeno haciendo pruebas muy dirigidas con los materiales ya conocidos como placas de acero inoxidable y agua destilada, estos materiales son muy conocidos en el funcionamiento de los generadores de gas hidrógeno, la diferencia con el trabajo de investigación aquí presentado es que no utiliza otros materiales como el acero A-53, el cual como parte de la gama de acero conocidos en el mercado no es investigado. Por otra parte en la introducción se hace mención al respecto de realizar pruebas físicas en motores de combustión interna pero el autor menciona que no le fue posible hacer pruebas en estos, debido a falta de tiempo y tal vez “de capacidad técnica”, esto resulta una verdadera falta técnica pues no tiene ningún sentido fabricar un generador de gas hidrógeno en la actualidad sin hacer una prueba mínima de sus aptitudes prácticas, debería toda investigación apegarse al método científico con la finalidad de lograr conclusiones satisfactorias. En lo que estamos de acuerdo y mencionado en sus conclusiones es que el gas hidrógeno no es todavía una alternativa aplicable, debido a que su obtención resulta todavía costosa, es necesario hacer más investigación para desarrollar técnicas económicas que permitan hacer superior la obtención el gas hidrógeno, además de que la sociedad está todavía muy acostumbrada al consumo de los energéticos fósiles como la gasolina, diésel, etanol, etcétera, y coincidimos en que el modo de pensamiento debe evolucionar hacia las alternativas renovables. <sup>[12]</sup>

Para continuar el Sr. Cristian Familiar Xaudaró, estudiante de la Facultad de Ingeniería Técnica Naval, España, expuso tesis para lograr el grado de Ingeniero, con el tema “inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales”, en este trabajo de investigación el autor expone la alternativa de hacer uso del gas hidrógeno en motores de combustión interna pero en los motores a diésel, logra hacer funcionar estos con cantidades pequeñas de gas hidrógeno y el complemento con el dicho combustible fósil, pero detecta que las emisiones contaminantes se incrementan sustancialmente con cantidades ligeramente por encima de las máximas permitidas, lo que hace inadmisibles su utilización como una alternativa energética “sostenible”, y recomienda profundizar los estudios para lograr disminuir los contaminante en esta mezcla de energéticos y poder hacer del hidrógeno una alternativa eficiente, no contaminante, no generadora de impactos adversos que promuevan el calentamiento global.

A comparación con el trabajo de investigación aquí presentado se hizo con una mezcla de gasolina e hidrógeno el cual presento buenos resultados en rendimiento lo que no hace una clara referencia pues fue utilizado otro energético distinto al citado. <sup>[13]</sup>

En el año 2009 el Dr. German Buitrón Méndez, Investigador del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., y la Ingeniera Carolina Carvajal Monroy estudiante del programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de U.N.A.M. realizaron trabajos de investigación al respecto de la posibilidad de generar gas hidrógeno de los procesos a partir de aguas residuales de la industria tequilera, empelando un biorreactor anaerobio, y desarrollando una metodología ya establecida en el ámbito académico. Concluyen lo siguiente, es factible producir gas hidrógeno a partir de las aguas residuales de la industria tequilera, las mejores condiciones encontradas en esta investigación, se obtuvieron a 35°C, y un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 6h, pH de 5.5 y carga orgánica de 5 g/L. y para la reducción del TRH a 6 h fue favorable para la producción fermentativa de hidrógeno, a 25°C y un TRH de 6 h no se observó producción de gas, evidenciando que las bajas temperaturas no favorecen la producción biológica de hidrógeno. <sup>[14]</sup>

Los resultados demostraron que a menor TRH es mayor la velocidad específica de producción de hidrógeno. Asimismo, se puede concluir que a temperaturas mesofílicas (35°C) se obtiene una mayor velocidad específica de producción de hidrógeno (VEHP) que a temperatura ambiente (25°C).<sup>[14]</sup>

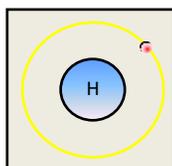
Esta investigación realizada en C.U. México U.N.A.M., demuestra una vez más la versatilidad que dispone el amito académico al respecto de la producción del gas hidrógeno, evidenciando que las tendencias hacia un futuro todavía no muy cercano, señalan claramente que se podrá optar por el uso de este energético como una las fuentes renovables más estudiadas y conocidas lo que indiscutiblemente hará del hidrogeno el energético del futuro.<sup>[14]</sup>

### I.3. Características del hidrógeno

El hidrógeno es un gas que tiene el más alto contenido energético de todos los combustibles conocidos  $120 \frac{kJ}{g}$  siendo alta comparada con los  $45.26 \frac{kJ}{g}$  (como se puede ver en la [tabla 1]) del gas natural, arde como una llama invisible a la luz del día, es no toxico, cerca del 10% del cuerpo humano contiene hidrógeno, después del Helio es el gas más difícil de licuar (sólido a líquido), y una estructura atómica definida (ver [figura 3]),se encuentra también en la materia orgánica, en el gas natural, el petróleo y el carbón, de forma tal que el hidrógeno se le requiere invertir una cantidad de energía para producirlo a partir de ciertos procesos químicos o bioquímicos.

[tabla 1], Propiedades básicas del hidrógeno<sup>[15]</sup>

Densidad energética	$120 \text{ kJ/g}$
Masa molecular	$2.016 \text{ mol/g}$
Punto de ebullición	$-252.7 \text{ }^\circ\text{C}$
Limite inflamable en aire	4 – 75 %
Punto de fusión	$-259.2 \text{ }^\circ\text{C}$
Densidad	$0.089 \frac{g}{\text{cm}^3}$
Temperatura critica	$-239.9 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura de auto ignición	$580 \text{ }^\circ\text{C}$



[Figura 3] estructura del átomo, del hidrógeno

El hidrogeno debido a que no se encuentra de forma natural en nuestro medio ambiente se utilizan diferentes procesos en la obtención, (aquí algunos) de estos procesos son:

- A. Electrolisis: consiste en la descomposición del agua por la aplicación de electricidad, lo que lo hace ser el método más difundido e incluso se realiza a nivel industrial, para demostraciones pues es versátil, hace eficiente el uso de la energía, se puede automatizar, y es rentable, lo que lo hace ideal para fines académicos, y que particularmente es el proceso que seguiremos para desarrollo de este trabajo de investigación.
- B. Reformado: consiste en la reacción de hidrocarburos con calor y vapor de agua. Es un proceso generalizado en la industria petrolera, se necesita una gran cantidad de energía lo que lo hace inconveniente.
- C. Gasificación: basado en la descomposición de biomasa e hidrocarburos que al estar en un ambiente saturado por un gas (aire, vapor de agua y oxígeno) a una cierta temperatura se transforma en hidrógeno, este proceso de obtención depende mucho de la biomasa o del hidrocarburo del cual se parte, así como su pureza.
- D. Ciclos termoquímicos: basados en calor de alta temperatura producido por la energía nuclear o solar concentrada y aplicada a un compuesto para cambiar su composición pasando a otro proceso que permite la liberación del hidrógeno y regresar al compuesto inicial.
- E. Biológica: mediante algas y las bacterias se produce directamente hidrógeno, este proceso de obtención se encuentra todavía en investigación, aunque con grandes perspectivas.<sup>[15]</sup>

Por lo tanto, los generadores de hidrógeno (GH<sub>2</sub>) en la actualidad, la producción de hidrógeno en nuestro país, en el Estado de Hidalgo, en Tulancingo de Bravo se enfrentan retos desafiantes como los siguientes:

- A. Costos elevados de producción, actualmente los costos para producir hidrógeno son relativamente más altos que los dispositivos que funcionan a base de los combustibles fósiles, influye en buena medida la capacidad instalada, disponibilidad de consumo, de alternativa comercial, de costumbre, pues con esto se observa la clara desventaja que tiene los GH<sub>2</sub> para su implementación actual, lo que las hace una alternativa en clara desventaja.<sup>[19]</sup>
- B. Baja demanda, a pesar de que se ha demostrado que la energía que se produce por hidrógeno es limpia y que tiene un amplio mercado para que se incremente el desarrollo y la inversión en GH<sub>2</sub> que lo produzcan, actualmente, existe un nivel sumamente bajo de demanda, el cual inhibe el desbordamiento de la capacidad de producción, tanto a nivel local, regional y nacional.<sup>[19]</sup>
- C. Tecnologías de producción de GH<sub>2</sub> más eficaces, se requieren de mayores mecanismos de producción, los cuales ofrezcan una mayor eficiencia, especialmente para producción a grandes escalas de hidrógeno, sin que las tecnologías empleadas produzcan emisiones de CO<sub>2</sub> o que se eleve el costo de producción (limpias).<sup>[19]</sup>

- D. Generar confianza en inversionistas privados y públicos, los beneficios que conlleva el generar GH2, bajo la idea de la producción de hidrógeno debe ser mostrada ante posibles inversionistas tanto del medio privado como público, esto produciría un mayor entendimiento, interés y futuras inversiones, contribuyendo al fortalecimiento de esta industria ya existente pero poco conocida. <sup>[19]</sup>
- E. Mayor incorporación de actores a la cadena de producción, la producción de GH2 para que el nivel de competencia incremente la calidad de los mecanismos, procesos y disminuyan los costos de producción. <sup>[19]</sup>

## **OBJETIVOS:**

### **I.- GENERAL**

Caracterizar y dar funcionamiento a un generador de gas hidrógeno (GH<sub>2</sub>), así como verificar su presencia con pruebas físicas, químicas, explosivas, y someterlo a una prueba de espectroscópica.

### **II.- ESPECÍFICO**

- Realizar pruebas con los materiales conocidos para construir un GH<sub>2</sub>.
- Caracterizar un GH<sub>2</sub> mediante la realización de pruebas experimentales, y reflejados mediante tablas, figuras y gráficas.
- Obtener un GH<sub>2</sub> que produzca cantidades pequeñas de gas hidrógeno.
- Realizar pruebas físicas y químicas en los productos del GH<sub>2</sub>, de tal manera que tengamos evidencia de su presencia.
- Realizar una espectroscopia al gas hidrógeno.

### **JUSTIFICACIÓN**

1. En este trabajo de tesis el justificante principal es encontrar una manera de producir gas hidrógeno, en el mismo ceno de nuestra casa de estudios, conocemos de la existencia de los generadores de hidrógeno, ya con un amplio estudio previo realizado en diferentes épocas y lugar de investigación por todo el mundo, así como los métodos más utilizados para lograr este fin.
2. En segundo término, el justificante de este trabajo de tesis, responde a una necesidad de superación personal y académica.

## Capítulo II

# EL HIDRÓGENO Y FUNCIONAMIENTO DEL GH2 POR EL MÉTODO ELECTRÓLISIS

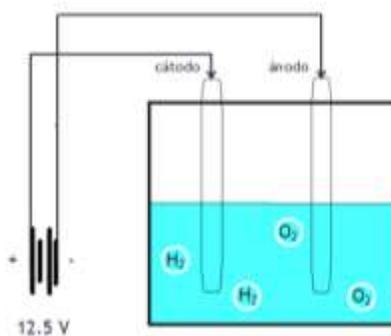
### II.1 Electrólisis

La electrólisis del agua será el método conocido a utilizar para la obtención del gas hidrógeno que demostrará la producción mencionada(a saber), objetivo de estudio de este trabajo. En la [Figura 4] aparece un esquema gráfico del funcionamiento del proceso de electrólisis que será aplicado en esta propuesta de generador de hidrógeno.

Para lograr la conductividad del generador utilizaremos electrodos metálicos, específicamente de acero y conductores de cobre correctamente fijados. Se conecta la fuente de energía a los dos electrodos, fabricados con acero y cobre (acero inoxidable y platino los más usuales) <sup>[2]</sup> que estarán en contacto con el electrolito. Aparecerá una carga en cada uno de los electrodos, por los vamos a diferenciar a partir de ahora como cátodo (cargado negativamente, electrodo en el que se producirá la reacción de reducción) y ánodo (cargado positivamente, en este electrodo se produce la reacción de oxidación).

En resumen, se pueden considerar varias fases en el proceso completo de electrólisis:

- Ionización: Fase previa de disolución del compuesto antes de que entre en contacto con la corriente eléctrica. <sup>[19]</sup>
- Orientación: Con la corriente eléctrica activa, los iones, según su carga positiva o negativa, se dirigen hacia el cátodo y el ánodo. <sup>[19]</sup>
- Descarga: Los aniones, ya situados en el ánodo, ceden electrones, mientras que los cationes, localizados en el cátodo, adquieren electrones. <sup>[19]</sup>



[Figura 4] Esquema electrólisis del agua <sup>[2]</sup>

Desde un punto de vista químico la ecuación de estequiometría que explica el proceso que sigue la reacción, que hace posible la generación de gas hidrógeno está representada por lo siguiente:



Cabe hacer mención que esta ecuación de equilibrio no es proporcionada por el autor de este trabajo de investigación, es bien sabido y usada como una referencia utilizada en diversos trabajos de investigación, reportes de laboratorio, publicaciones, etcétera, lo que la hace particularmente de uso común hasta la fecha, pero retomando esta expresión química y posterior a la aplicación de un diferencial de voltaje, entre placas que la integran podemos observar la formación de moléculas de oxígeno y de hidrógeno, ambos como gas, esto fue observado del lado derecho de la ecuación química ecuación II-1.

Este proceso es poco usado con fines industriales debido a que el hidrógeno puede ser producido a menor costo por medio de combustibles fósiles, pero éstos tienen un impacto ambiental muy severo. El uso de hidrógeno como combustible es una alternativa altamente ecológica si se obtiene a partir de la electrólisis del agua, pues no emite CO<sub>2</sub>. Uno de los objetivos de este trabajo de investigación es de generar una cantidad de gas hidrógeno, con la finalidad de sustituir al combustible fósil, gasolina premium.

El concepto de la electrólisis podemos entenderlo como un proceso que separa químicamente los compuestos de un elemento, por otro lado, el agua visto como un conjunto de elementos (H<sub>2</sub>O principalmente ) sufre de este proceso lo que da origen a la obtención en estado puro de hidrógeno y oxígeno en diferentes proporciones según se observan las ya conocidas reacciones químicas, claro que para que este proceso se lleve a cabo es necesario el consumo de energía libre, resultara necesaria para la descomposición de las moléculas de agua, la electricidad inducida es la responsable de esto pues la repulsión de los átomos de hidrógeno y oxígeno la requieren para romper sus enlaces iónicos, a este proceso se le conoce como oxido-reducción. <sup>[16]</sup>

La reacción que ocurre en el generador de hidrógeno ocurre de la manera siguiente, trataremos de utilizar un lenguaje claro y sencillo que nos proporcione una idea central, al igual que en las pilas electroquímicas, ocurre una oxidación anódica y una reducción catódica. Una vez conectada la fuente de voltaje directa al generador de hidrógeno, el electrodo que se une al borne positivo del generador es el ánodo y el electrodo que se une al borne negativo del generador es el cátodo. Cabe recordar que el ánodo el polo positivo del generador, y el cátodo el polo negativo. <sup>[16]</sup>

De la electrólisis y estrictamente hablando del fenómeno que ocurre en un contenedor de material indistinto, aunque cabe mencionar que utilizar materiales aislantes, son necesarios debido a que evitamos descargas directas del contenedor para los que la manipulan, por la conductividad del mismo. El contenedor que se utiliza es el propio generador de gas hidrógeno, que este fue habilitado y diseñado en el laboratorio de la Maestría en Energías Renovables, contiene en su interior el electrolito(agua), y de tal manera que los electrodos(placas de acero inoxidable)están sumergidos en esta, o sea, que el

contacto se logra en el momento que el agua se introduce en el generador de gas hidrógeno, un electrodo es conectado como polo positivo (ánodo), y el otro es conectado como polo negativo (cátodo), en este momento que se hacen las conexiones, el generador de hidrógeno junto con el electrolito forman un circuito cerrado, que seguramente hacen valer las leyes de la electricidad, al menos por los voltajes y los amperajes que ocurren a través de esta, en base a esta idea descrita podemos pensar que es un espacio delimitado por conductores, pues por un lado los conductores metálicos producto de las placas de acero inoxidable y por la otra los conductores formados por las sales disueltas o disoluciones electrolíticas contenidas en el electrolito (agua), pues algunos minerales son los responsables de este fenómeno, aunque es ya sabido que la corriente se describe en un flujo de electrones en la parte metálica del circuito y un flujo de iones en la parte que corresponde al electrolito (agua).<sup>[18]</sup>

El fenómeno de la electrolisis que se verifica en este trabajo de investigación, básicamente se trata de la disgregación de la molécula del agua conocida ( $H_2O$ ), sin considerar los demás componentes minerales que dispone estas, y por ello sabemos que se generan entonces moléculas de hidrógeno ( $H_2$ ) y moléculas de oxígeno (O), esto por medio de la aplicación de un diferencial de voltaje. Es sabido que al electrolito suele agregársele hidróxido de sodio para hacer más eficiente el proceso de producción de gas hidrógeno, aunque en este trabajo de investigación no fue el caso pues el agua utilizada por sí sola presentó resultados. Claro que esto fue posible gracias al fenómeno de la electrolisis, una fuente de energía eléctrica proporcionó el voltaje suficiente para lograr esta disgregación de moléculas.<sup>[18]</sup>

Al respecto de la producción de gas de hidrógeno, se observa que el modo de conexión al respecto del ánodo y el cátodo<sup>[17]</sup> será de la siguiente manera, el gas hidrógeno se produce del lado cátodo (electrodo negativo), y el gas oxígeno aparece por el ánodo (electrodo positivo).

Con fines de lograr hacer una caracterización del generador de gas hidrógeno, en este trabajo de investigación se utilizó un voltaje y amperaje determinado, el voltaje de 12.5V y el amperaje de resultado de este, fue de 0.5A, aunque se sabe que el diferencial de voltaje mínimo necesario para hacer de esta reacción electrolítica es de 1.23 V, pues resulta necesario sobre pasar algunas “barreras” de activación del proceso electrolítico, esto probablemente está relacionado con la escasa conductividad del agua pura que es  $0.055 \mu S/cm$ .<sup>[17]</sup>

Con la aplicación de este voltaje por arriba del mínimo señalado anteriormente es posible visualizar de manera clara la producción de gas hidrógeno y resulta por demás comentar que la producción de gas hidrógeno es proporcional al voltaje aplicado, mismas condiciones para la producción de gas oxígeno que no es objeto de estudio en este trabajo de investigación.<sup>[17]</sup>

Las reacciones que tiene lugar en los electrodos ocurren de la siguiente manera mostrada de una manera algebraica: <sup>[21]</sup>

- Reducción en el cátodo  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$  <sup>[18]</sup>
- Oxidación en el ánodo  $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$  <sup>[18]</sup>

Como se puede observar el número de moléculas de hidrógeno duplica a las moléculas de oxígeno, además el número de electrones transportados a través de los electrodos es el doble del número de hidrógenos producidos y el cuádruple del número de moléculas de oxígenos producido. <sup>[21]</sup>

## II.2 Expectativas del Hidrógeno

El hidrógeno (H<sub>2</sub>) es un combustible en el que se están depositando muchas esperanzas y al que se está dedicando un gran esfuerzo de investigación, sin embargo, el hidrógeno no es un combustible más, por una parte, tiene propiedades físicas y químicas como los demás combustibles conocidos (gas gasolina, diesel, carbón, etcétera), y por otra, no es un recurso natural pues, no se encuentra de forma unitaria en la naturaleza, sino que se encuentra combinado en otros elementos, como los hidrocarburos y/o el agua.

El hecho de que el hidrógeno no se encuentre de manera aislada en la naturaleza nos obliga a utilizar el conocimiento científico que hemos acumulado a lo largo de la historia humana, siendo esto un problema actual para su uso masivo en el futuro, y uno de los campos en los que más recursos se están invirtiendo, pues muchas de las ventajas de su uso pueden quedar anuladas en función del procedimiento empleado en su obtención, una vez producido, sus particulares propiedades físicas y químicas complican en gran proporción las tareas de manipulación, especialmente las relacionadas con su almacenamiento, transporte y distribución. <sup>[15]</sup>

### 1.- Razones de eficiencia energética.

Entre las formas de energía del hidrógeno esta la química esta puede ser convertida de manera directa en energía eléctrica, sin una acción térmica para lograr potencia, esta conversión se cumple en las pilas de combustible, capaces de convertir por medios electro-químicos la energía química del H<sub>2</sub> en energía eléctrica, y que definitivamente esto se traduce en el concepto de potencia. <sup>[15]</sup>

La supresión del ciclo termodinámico permite superar las limitaciones impuestas por el ciclo de Carnot, alcanzándose así buenos valores de rendimiento energéticos, la energía eléctrica producida

puede emplearse tanto con fines estacionarios, (electricidad como energía para consumidores industriales, domésticos y de servicios) como en el transporte, mediante su uso en vehículos eléctricos, telecomunicaciones, y para diversos usos civiles. <sup>[15]</sup>

2.- Razones de dependencia energética.

En la actualidad todavía se presenta una fuerte dependencia de los combustibles fósiles, de los que al parecer en pocos años veremos en la proximidad su agotamiento, así, las reservas de petróleo se estiman en 40, las de gas natural en 60 y las de carbón en 200 años respectivamente <sup>[6]</sup>, esta limitación de reservas va unida en muchas ocasiones a una elevada concentración de los yacimientos (muy elevada en el caso del petróleo, menores cantidades el gas natural y carbón). <sup>[15]</sup>

lo que facilita presiones políticas por parte de los países productores, esto está obligando direcciones hacia otras fuentes de energía: las renovables, si bien el H<sub>2</sub> no es una fuente natural energética, sí facilita la obtención y almacenamiento de esta, y puede ser producido a partir de fuentes renovables, por lo que puede jugar un papel importante en cuanto a la reducción de la dependencia energética, que también se ve favorecida por el elevado rendimiento en la conversión. <sup>[15]</sup>

2.- Razones medioambientales.

Aunque de manera indirecta las razones anteriores repercuten de manera favorable en el medio ambiente, existe una ventaja adicional para el uso energético del H<sub>2</sub>: su combustión sólo libera vapor de agua, libre de CO<sub>2</sub>, esto supone que si en el proceso de producción no se ha emitido CO<sub>2</sub> (habiendo varias alternativas para ello), la producción de electricidad a partir de H<sub>2</sub> está libre de emisiones al igual que la electricidad producida por la vía renovable, <sup>[7]</sup>

En la [Tabla 2] se recogen las densidades de energía (volumétricas y másicas) de varios combustibles en su forma más usual de consumo conocido, se aprecia que el hidrógeno es mejor en almacenamiento energético, se puede observar que supera en más del 200% de energía por unidad de masa que los demás, pero al ser tan ligero ( $89.3 \text{ g}/\text{m}^3$ ) es el que menor energía almacena por unidad de volumen. <sup>[15]</sup>

Este hecho complica el manejo de este, comparado con la gasolina o el gas butano, especialmente en aplicaciones en las que el H<sub>2</sub> deba ser desplazado por la aplicación gubernamentales de otras maneras de obtener energía (aplicaciones de transporte y portátil):

[Tabla 2] Densidad energética de algunos energéticos conocido <sup>[15]</sup>

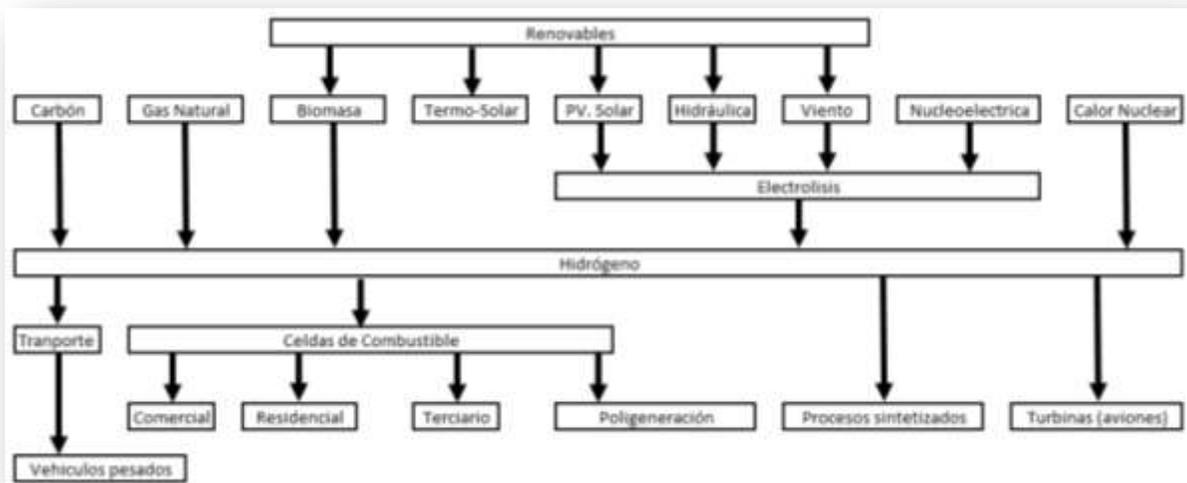
Energético	Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Volumen [ $\text{kWh}/\text{m}^3$ ]	Masa [ $\text{kWh}/\text{kg}$ ]
<i>H<sub>2</sub> liquido (1bar, 252.8 °C)</i>	70.71	2,375	33.59
<i>H<sub>2</sub> gas (300 bar, 25°C)</i>	20.55	690	33.59
<i>H<sub>2</sub> (700 bar, 25°C)</i>	47.96	1,611	33.59
<i>Gas natural (1 bar, 25°C)</i>	0.65	9.1	13.93
<i>Butano liquido (25°C)</i>	550	7,000	12.73
<i>Gasolina</i>	750	9,270	12.36

El H<sub>2</sub> precisa un elemento de conversión directo o indirecto, las pilas de combustible son un sistema directo de conversión de energía, es decir, transforman la energía química del H<sub>2</sub> en energía eléctrica; los motores de combustión interna (alternativos o turbinas de gas) transforman la energía química del H<sub>2</sub> en energía mecánica, la cual puede ser empleada para mover un dispositivo mecánico, en el caso de los motores de auto, las bombas de agua o el alternador, aunque los problemas técnicos inherentes a la combustión de H<sub>2</sub> son menores que los que se presentan en las pilas de combustible, hoy día el impulso y el apoyo gubernamental a éstas últimas es mayor en los motores de combustión que con las pilas de combustible, estando justificado por su mayor eficiencia y, tal vez por intereses de otro tipo.

Las pilas de combustible presentan elementos en común tanto con las baterías como con los motores de combustión interna, así las pilas de combustible se asemejan a las baterías en que es la electroquímica la que rige el comportamiento de ambas, produciendo así los dos dispositivos corriente continua, por el contrario, las pilas de combustible se diferencian de las baterías en que no almacenan energía, sino que transforman la energía química de un flujo continuo de hidrógeno en electricidad, cesando la producción eléctrica al cesar el suministro de H<sub>2</sub>.<sup>[8]</sup>

Esta continuidad de electricidad es común en motores de combustión interna, aunque sabemos que en estos el ciclo de Carnot tiene presencia y en las pilas de combustible no.

La [Figura 5] resume los diferentes medios y procesos conocidos por los cuales se logra obtener gas hidrógeno, así como los usos más conocidos para el aprovechamiento de este energético innovador, en esta figura podemos observar el vehículo en la hidráulica que a su vez conlleva al proceso de la electrolisis (utilizado en este trabajo de investigación), y aplicado en el rublo del transporte público, pues es objeto de prueba el uso del gas hidrógeno en los motores a combustión<sup>[6]</sup>.



[Figura 5] El Hidrógeno desde su obtención y sus aplicaciones<sup>[15]</sup>

En palabras de Antonio González García-Conde, presidente de la Asociación Española del H<sub>2</sub>, “la visión de la economía del H<sub>2</sub> se basa en la expectativa de que el H<sub>2</sub> pueda producirse a partir de recursos domésticos, de forma económica y medioambientalmente amigable y en que las tecnologías de uso terminal tengan una ganancia aceptable, en la medida que se alcancen estas ganancias cuantitativas, la economía del H<sub>2</sub> ayudará al mundo proporcionando mayor seguridad energética y mayor calidad medioambiental”.<sup>[15]</sup>

Ahora bien, para alcanzar este objetivo se requieren superar muchos desafíos técnicos, sociales y políticos”<sup>[9]</sup>, como se deduce del enunciado anterior, para la implantación de la economía del hidrógeno se requiere alcanzar la sostenibilidad tanto en los sistemas de producción como en los de conversión.

### **II.3 Producción del Hidrógeno**

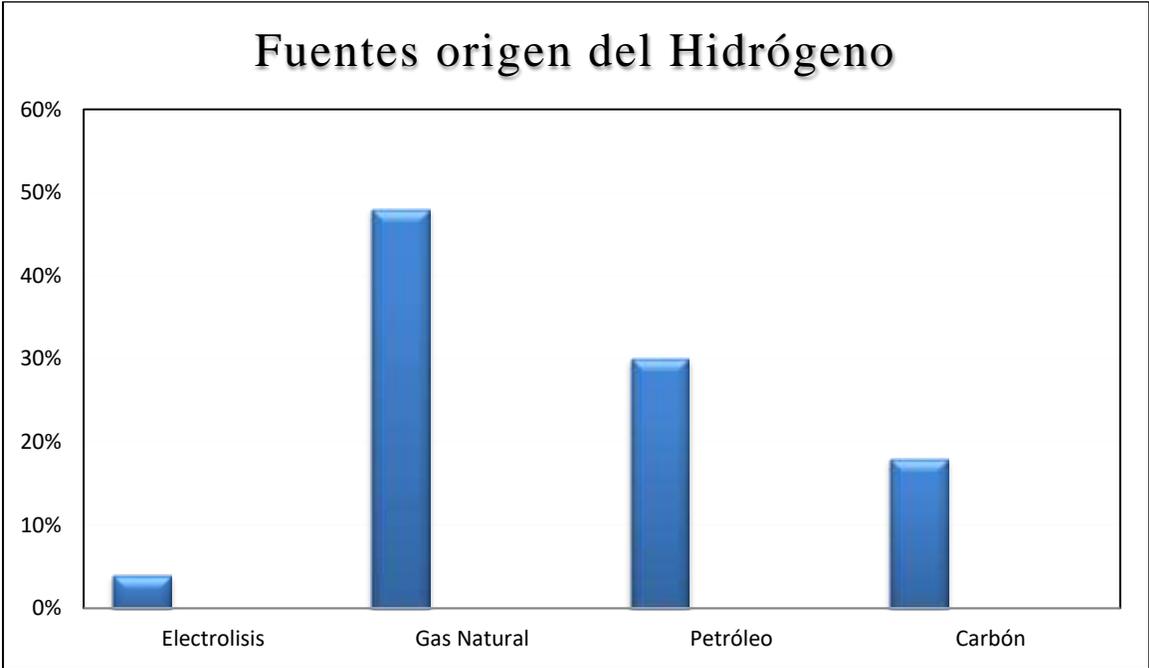
Puesto que el H<sub>2</sub> no se encuentra aislado en la naturaleza es preciso obtenerlo a partir de otras materias primas llevando a cabo ciertos procesos de transformación, aparentemente la producción de H<sub>2</sub> no debería ser un problema que requiriese investigación, pues hoy en día se produce H<sub>2</sub> con fines industriales mediante procedimientos bastante estudiados y ampliamente tecnificados.

Actualmente se producen en el mundo alrededor de 41 millones de toneladas de H<sub>2</sub>, que representan un valor energético de 5.000 TJ<sup>[15]</sup>, la demanda de energía primaria mundial en 2003 fue de  $4 \times 10^8$  TJ<sup>[15]</sup>, mientras que en la Unión Europea de  $0.6160 \times 10^8$  TJ<sup>[15]</sup>, esto significa que con el H<sub>2</sub> producido en el mundo se cubrirían apenas 12 ppm<sup>[15]</sup> de las necesidades mundiales de energía primaria o 81,2 ppm<sup>[15]</sup> de las necesidades de la Unión Europea.

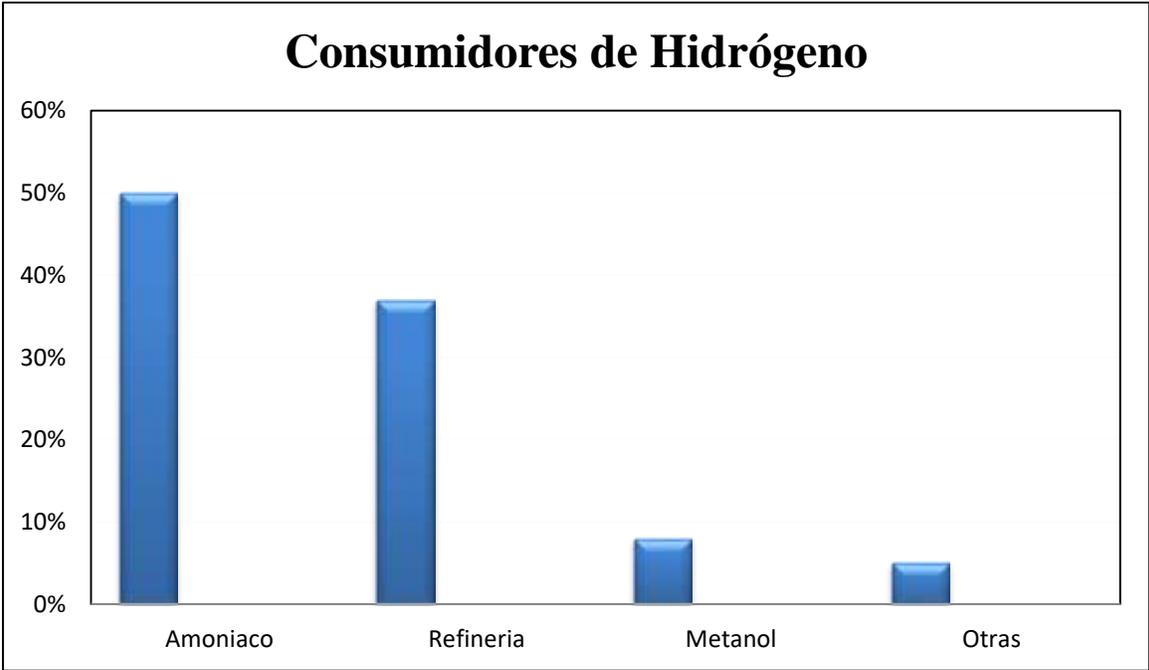
Resulta evidente, por tanto, que si se desea alcanzar un escenario de economía del H<sub>2</sub> es preciso producirlo de manera masiva y a partir de una elevada diversidad de fuentes en aras de poder garantizar el abastecimiento energético.<sup>[15]</sup>

En la [Figura 6] se representan las fuentes energéticas de las que se obtiene el H<sub>2</sub> actualmente, produciéndose casi la mitad a partir del gas natural, en concreto, el 96% del H<sub>2</sub><sup>[15]</sup> requiere como energía primaria combustibles fósiles, siendo el 95%<sup>[15]</sup> de la producción “cautiva”, es decir, se produce para consumo propio de las industrias que lo demandan.<sup>[15]</sup>

En la [Figura 7] se muestran los usos que actualmente se dan al H<sub>2</sub>, siendo de tipo químico el 72% y nada para fines energéticos, estas cifras demuestran que los sistemas productivos actuales no están preparados para satisfacer las demandas del “mercado del H<sub>2</sub>”, siendo preciso actualizarlos a las demandas actuales.<sup>[15]</sup>



[Figura 6] Gráfica que muestra el origen del Hidrógeno producido actualmente [15]

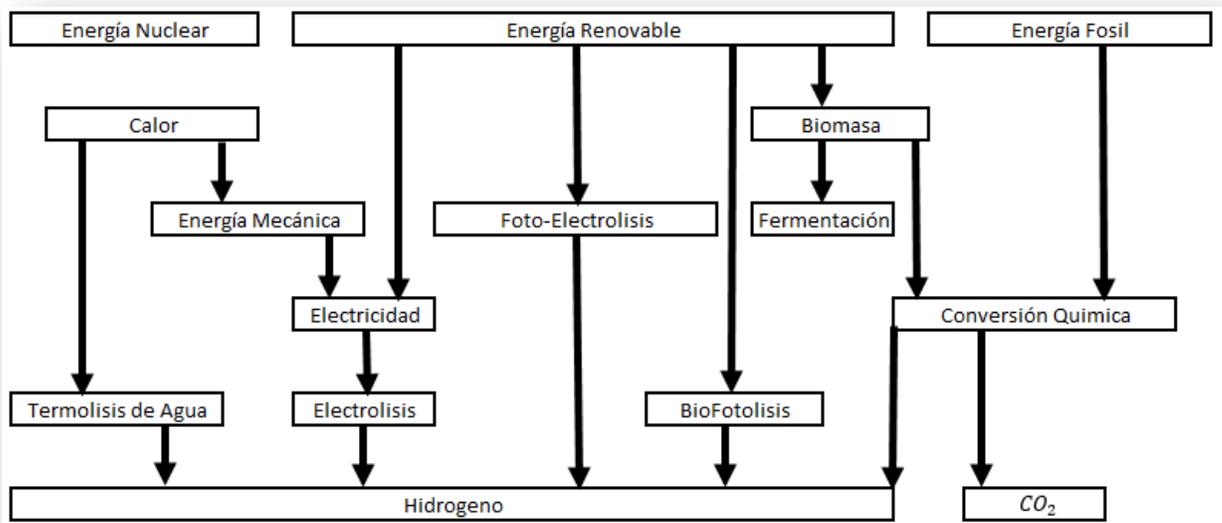


[Figura 7] Gráfica que muestra las aplicaciones actuales del hidrógeno [15]

Afortunadamente los métodos actuales utilizados para producir H<sub>2</sub> son varios, en la [Figura 8] se muestran las principales técnicas para su obtención, en la gráfica se aprecia que si se realiza una clasificación atendiendo a las fuentes y mostrando que varias de ellas comparten el mismo proceso. <sup>[15]</sup>

Así, la electrólisis se puede llevar a cabo a partir de energía nuclear o de energía eólica, siendo el proceso físico similar, algo similar ocurre con los procesos de termólisis, que pueden ser activados desde la energía nuclear o desde la energía solar de alta temperatura, la gasificación es otro ejemplo de proceso que se puede aplicar al carbón (combustible fósil) o a la biomasa (renovable).

Es por ello que para no repetir contenidos se va a establecer, en primer lugar, una exposición de los métodos de obtención de H<sub>2</sub> basada en los procesos y no en las fuentes, seguidamente se abordarán los sistemas de implantación desde las diferentes fuentes para utilizar los procedimientos descritos. <sup>[15]</sup>



[Figura 8] Métodos de producción del Hidrógeno. <sup>[15]</sup>

### Capítulo III

## **CARACTERIZACIÓN DEL GENERADOR DE GAS HIDRÓGENO (GH<sub>2</sub>)**

### **III.1 La pregunta ¿Cómo generar hidrógeno?**

Esta pregunta nace por la necesidad de encontrar una respuesta actual de una alternativa física, real, tangible, de un sustituto de energético que logre entre otras cosas eficiencia, ahorro económico, un producto amigable con el medio ambiente, no contaminante, que logre un equilibrio con el medio ambiente que habitamos sin alteraciones de ecosistemas, ni perturbaciones globales como el famoso “cambio climático”, lo interesante sería lográndolo de un compuesto o elemento que tenga características de recurso renovable, o sea, que sea sustentable, como el viento, la luz solar, energía nuclear, etcétera, esta respuesta deberá ser posible con algún dispositivo que logre un presupuesto bajo, de manera segura para los que lo desarrollan y los que en su caso logren esta aplicación su obtención deba cumplirlo también.

En la Universidad Politécnica de Tulancingo ¿será posible realizar un dispositivo que sustituya el combustible fósil, “Gasolina”, consumido por los motores de combustión interna?, tales como motores comunes en la construcción de obra civil, tales como, motores tipo honda de 4 hp, si bien es cierto que cumplen con la función de uso, pues sus tiempos prolongados de consumo lo hacen eficientemente hasta cierto punto, pues los costos actuales del energético que lo hace funcionar(gasolina)lo hace ya hoy, muy inconveniente, no podemos simplemente continuar con incrementos de combustibles progresivos, emisión de gas nocivos al medioambiente (CO<sub>2</sub>), pues estos motores pueden funcionar hasta 8 hr por jornada de trabajo y multiplicándose su impacto por el número de estos en el lugar donde sean utilizados.

### **III.2 Investigación y empirismo**

Es sabido que en la actualidad se utilizan varias alternativas energéticas como respuesta de esta pregunta, por ejemplo, es trillado hoy, que la energía eólica es una alternativas de generación que logra en ciertas condiciones eficiencias aceptables de tal manera que resultan coincidentes con los comentarios antes mencionados, es una realidad, no vamos muy lejos en esta casa de estudios la

Universidad Politécnica de Tulancingo, existe un parque a base de 5 aerogeneradores, cuya funcionalidad es una realidad, pues ya están en operación, proporcionando una respuesta ecológica, limpia, y funcional, digamos que es una manera amigable con el medio ambiente lo que la hace sustentable, pues el viento no produce contaminante alguno, y la energía que transforma las palas del rotor producto de accionar del viento sobre está generando energía eléctrica que hace posible el funcionamiento de muchos dispositivos eléctricos y electrónicos, es una muestra.

### **III.3 La Hipótesis**

En resumen, la investigación que hemos realizado con los diferentes autores encontrados en las diversas bibliografías consultadas, nos hace pensar y debido a los amplios beneficios que el hidrógeno presta, desde el punto de vista de energético sustituto, y debido a la aplicación ya realizada en motores de combustión interna como los camiones de BMW, ya conocido en todo el mundo, ¿tenemos nosotros en la Ciudad de Tulancingo de Bravo, la posibilidad de generar hidrógeno como sustituto energético?, aplicado en un motor de dimensiones pequeñas como primer dispositivo de prueba. Otra pregunta que se genera como consecuencia de la primera es ¿en la Universidad Politécnica de Tulancingo, podremos desarrollar un GH2?.

Sabemos que en el mercado nacional e internacional existen a la venta estos dispositivos de generación de hidrógeno, a base de materiales como el acero y metales preciosos como el platino lo cual nos hace pensar en una solución costosa, ¡el reto!, sería lograr sustitutos más económicos tales como acero estructurales o inoxidable como componentes básicos, y que además sean de fácil adquisición que resuelvan problemas económicos.

Este reto es una posibilidad para el desarrollo de este trabajo, pues, por un lado, las instalaciones que dispone la Universidad Politécnica de Tulancingo, seguramente son un espacio suficiente, seguro, y por esto y mucho más esta sobrado para el desarrollo de este trabajo, los talleres que dispone son suficiente en herramienta y maquinaria para los diferentes trabajos a realizar.

Por estas razones concluimos que podemos con muchas posibilidades de éxito lograr fabricar un GH2, funcional, económico, con una eficiencia, adaptada a las necesidades requeridas, que logren las expectativas mencionadas.

### **III.4 Partes de un generador de hidrógenos**

Un generador de hidrógeno, es un dispositivo que se podría utilizar para alimentar con gas hidrógeno a los motores de combustión interna, como en los de gasolina por ejemplo.

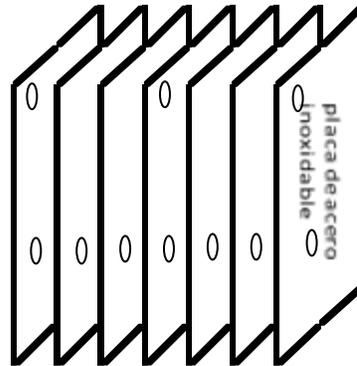
Un Generador de Hidrógeno (GH2), utiliza como materia prima agua, voltaje y amperaje, por medio de un proceso de electrólisis, el generador de hidrógeno nos proporciona por separado hidrógeno y oxígeno, estos gases altamente combustibles son enviados a la entrada de aire del motor donde se mezclan con el combustible utilizado. La energía del hidrógeno mejora la combustión, proporciona mayor potencia, reduce el consumo de combustible fósil y al haber menor presencia de estos y una vez quemado disminuye los contaminantes como CO y CO2.

Básicamente, un generador de hidrógeno es un dispositivo que separa el hidrógeno y el oxígeno del agua, <sup>[20]</sup> de manera que el gas de hidrógeno puede ser utilizado en diversas aplicaciones y pueden ser en los motores a combustión interna, puesto que puede aportar con la reducción de gases contaminantes producto del ciclo que describe este proceso químico -mecánico.

Está compuesto por varias placas de acero en donde se comunican con el electrolito que es suministrado por un orificio previo al armado del generador de hidrógeno, cuando al generador se le aplica un voltaje la corriente que por el electrolito circula hace que se separe el hidrógeno y el oxígeno del agua en forma de gas mediante un proceso llamado electrólisis, para ello utiliza energía eléctrica con ciertas condiciones controladas.

Las principales partes que conforman un generador de hidrógeno son esencialmente las placas de acero, el agua (H<sub>2</sub>O), son esencialmente los componentes que deben estar presentes para que inicie la generación de gas hidrógeno. Recapitulando la generación de gas hidrógeno se presenta por medio de la electrólisis, se induce un voltaje y una corriente en el medio que se forma entre las placas de acero y el agua (H<sub>2</sub>O), la disposición que brindan las placas hacen de un contenedor para el agua pura utilizada en este trabajo de investigación que lo hace posible. La forma que presente el generador de gas hidrógeno (GH2) depende de los materiales disponibles y de la creatividad de su constructor.

En la siguiente [Figura 9] podemos observar alguna de estas partes importantes que hacen posible el funcionamiento de un generador de hidrógeno, como las placas de acero inoxidable, en el entendido de que entre las placas de acero mencionadas ocupa lugar el agua pura utilizada y disponiendo a cada una de las placas de acero dos perforaciones necesarias para lograr el libre drenaje del agua y el gas hidrógeno producto de la reacción química que ocurren en el interior de este dispositivo.



[Figura 9] Distribución y acomodo de placas de acero inoxidable en el GH2

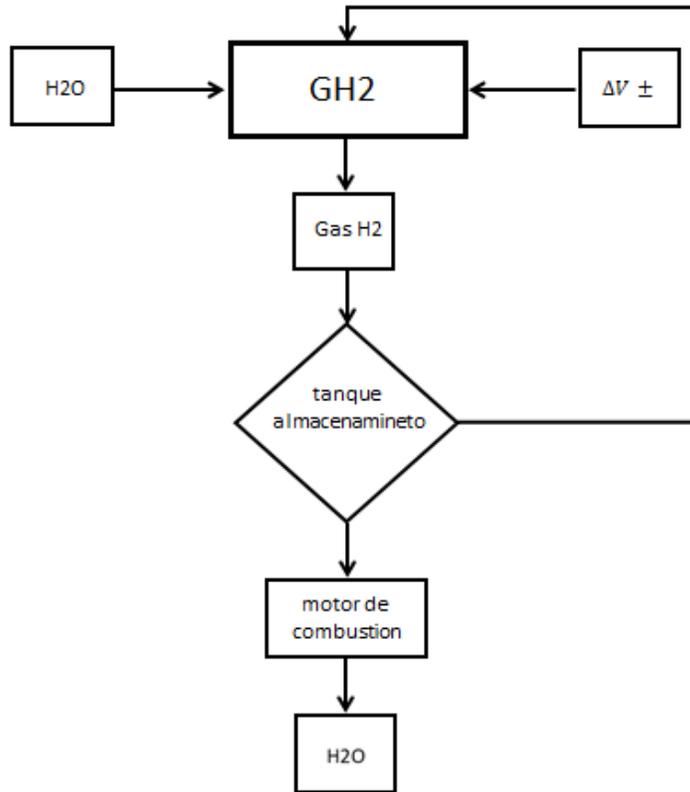
### III.5 Experimentación

#### III.5.1 las propuestas

En este trabajo de investigación se realizaron tres propuestas de construcción para la obtención del generador de gas hidrógeno, las cuales fueron fabricadas con los mismos materiales, la diferencia estriba directamente en las placas de acero que fueron utilizadas para lograr la electrolisis que permita separar las moléculas conformadas por el agua y obtener de tal manera por un lado las moléculas de hidrógeno en su forma química  $H_2$  y por otro lado oxígeno en su forma química  $O$ .

A continuación se muestra un diagrama de flujo que indica los diferentes dispositivos que deberán estar presentes para lograr hacer una producción de gas hidrógeno de manera segura con fines de caracterización y puesta en funcionamiento. Ver [Figura 10]

Esto resulta de las consultas realizadas a las diferentes referencias bibliográficas citadas en los anexos de este trabajo de investigación y en las cuales se mencionan una serie de complementos que deberán estar presentes para asegurar un experimento con resultados confiables y seguros, mismo que permitirá realizar la caracterización y funcionamiento del generador de hidrógeno.



[Figura 10] Diagrama de flujo de los “dispositivos necesarios para la generación de gas hidrógeno, posible uso de este y resultado de la combustión interna”

### III.5.2 Primer propuesta

Las placas de acero utilizadas son al carbón y se le clasifica como A-53 estructural, este dispone de una mezcla entre dos minerales esencialmente, uno con mayor presencia que otro, los cuales son para el mineral de hierro a más del 98% de este y para el carbono de entre un 0.5 *al* 2% y otros minerales, como el Azufre(S), Aluminio(Al), Cobalto(Co), Molibdeno(Mo), Boro(B) por citar algunos de los de mayor presencia, ver la [Figura 11]



[Figura 11] imagen del GH2 con placas de acero A-53 ensamblada.

### **III.5.3 Segunda propuesta**

Esta propuesta, fue construida con placas de acero inoxidable calibre # 24 la cual está compuesta a base de mineral de hierro, una cantidad pequeña de entre el 0.04 *al* 2.0 % de carbono y una cantidad de entre el 5% *al* 8% de Níquel (Ni), y que por procesos de fundición se logra esta unión de materiales.

Los trabajos relativos al habilitado, tales como medidas, cortes, lijados, perforaciones, cepillados, armados, y lavado de piezas fueron realizados en las instalaciones de la UPT y con equipos pertenecientes a esta casa de estudios, posterior a la descripción de los materiales utilizados en las placas adelante mostrados, se realizará la descripción detallada de los trabajos de habilitado para la fabricación del GH2.

### **III.6 Procedimiento de fabricación del generador de hidrógeno (GH2)**

Como comienzo se describen detalladamente de los materiales utilizados para la realización de la GH2, esto se describe en la propuesta dos, debido a que la diferencia en funcionamiento es notorio en esta por lo que en la propuesta uno solo haremos mención del componente que hace la diferencia en esta lista de materiales y que además todos ellos fueron adquiridos en el mercado local, no hubo la necesidad de trasladarse fuera de la Ciudad de Tulancingo de Bravo, ni siquiera de solicitarlos vía

pedidos o encargo de tipo foráneo, todos los materiales aquí citados fueron adquiridos en el mercado local de este Municipio.

Cabe hacer notar que incluso se utilizaron materiales de reciclado o en desuso por la simplicidad de este proyecto, lo que impacto directamente en los costos de adquisición de los materiales aquí citados.

Esta primera propuesta para concebir el GH2, fue a base de placa de acero tipo A-53 el cual está fabricado en placa de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de espesor en 10 x 8 cm de dimensiones en su superficie, se anexa una imagen del esta placa, ver [Figura 10], para estas piezas fueron dispuestas en 4 placas y que además fueron adquiridas del proveedor ya habilitadas lo que facilito su disposición, el trabajo que se hizo para completar su habilitado fue limpieza para retirar grasa, y escoria en general, lijado con lamina de papel del No. 500 y No. 600 las cuales mostraron un acabado de superficie muy fino lo que debería hacer bastante eficiente su funcionamiento, posterior a esto procedimos a perforar dos agujeros de  $\frac{3}{8}$ " de diámetro en las cuatro placas propuestas, esto para lograr la interconexión del fluido que motiva la reacción química señalada (electrolisis), esto fue realizado con taladro tipo industrial de  $\frac{1}{2}$ " perteneciente al laboratorio de esta casa de estudios.

Las perforaciones corresponden a fines de comunicación, funcionamiento y operación, las dos placas colocadas en los extremos dispusieron de tres y las centrales de dos correspondientemente, las placas de los extremos disponen de tres agujeros debido a que en un extremo, ver [Figura 12] se colocan conexiones para hacer correr un determinado voltaje a un amperaje, y con una fuente de voltaje específica, las dos perforaciones restantes corresponden a las dos realizadas en el centro de esta con la finalidad de que el agua logre intercomunicar y generalizar la reacción química que proporciona la generación de moléculas de hidrógeno y de oxígeno correspondientemente, además de que a esta se le habilito un corte en la placa de forma que describe un triángulo virtual de 1.5 cm de lado, esto con la finalidad de diferencial las placas interiores de las exteriores y por la facilidad de ensamblado pues los espacios no son muy grandes.



|Figura 12| Placas de acero A-53 habilitadas

Estas placas fueron habilitadas en el laboratorio de Energías Renovables, las perforaciones que se les observan fueron realizadas con taladro industrial de 1/2" de capacidad, las perforaciones centrales corresponden a los drenes que hacen posible la interconexión de agua dentro de las cavidades que se generan entre las placas de acero y los empaques de espuma.

Las perforaciones que se ubican en el extremo superior izquierdo son para hacer las conexiones del ánodo y cátodo respectivamente por donde hacemos ingresar a esta una diferencia de potencial necesaria para lograr hacer la reacción química que genera hidrógeno y oxígeno.



[Figura 13] imagen de las placas de acero A-53

### **III.6.1 Experimentación en las propuestas 1° y 2°**

Como primer punto comenzamos haciendo una descripción detallada de los materiales utilizados para la realización del GH2, los cuales fueron adquiridos en el mercado local, no hubo la necesidad de trasladarse fuera de la Ciudad de Tulancingo de Bravo, ni siquiera de solicitarlos vía pedidos o encargo de tipo foráneo.

A continuación, hacemos una descripción de los materiales utilizados en la fabricación del generador de combustible los cuales enumeramos y describimos físicamente con una imagen que se apega a sus características físicas:

### III.6.1.1 Materiales

1.- Placa de acrílico transparente de 6 mm de espesor y conexiones de bronce para salida de los gases de hidrógeno y oxígeno, además de que cumple la función de llenado y drenado del electrolito (fluido reactivo) una vez alojado en el interior del GH2, cabe recalcar que estos materiales fueron adquiridos en el mercado local de Tulancingo de Bravo, ver [Figura 14].



[Figura 14] imagen de las placas de acrílico transparente

Nota: esta placa de acrílico fue perforada en su perímetro con 12 agujeros de 5/16 de diámetro para hacer posible la sujeción del conjunto con tornillería galvanizada de 5/16”.

2.- Lamina de acero inoxidable de calibre No. 24, estas fueron habilitadas en ocho placas de forma rectangular con medidas de 9 x 14 cm, fueron cortadas en laboratorios de la Universidad Politécnica de Tulancingo, con el equipo de corte tipo caladora y sierras de 1 ½” de longitud para este tipo de trabajo, ver [Figura 15].



[Figura 15] Lámina de acero inoxidable calibre No. 24

3.- Empaque tipo espuma, este material fue habilitado en aros de 9 cm de diámetro, el cual demostró excelentes resultados pues contiene y sella perfectamente el volumen de agua (electrolito) necesaria para realizar la reacción química que genera la separación de las moléculas de hidrógeno y oxígeno, ver [Figura 16].

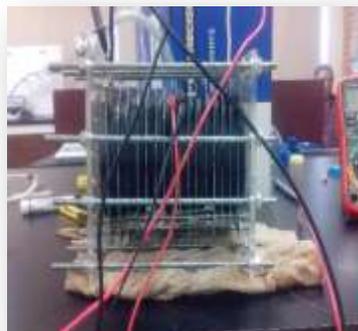
Se habilitaron empaques de tipo “rectangular”, cuyo funcionamiento correspondía exactamente a las descritas circulares, pero demostró ser ineficientes, pues mostraban deformaciones apreciables a través del acrílico que las contenía, permitiendo fugas de electrolito.



[Figura 16] Imagen de los empaque tipo espuma utilizados para sellar las cámaras del GH2

El resto de los materiales utilizados son tornillería de acero galvanizado utilizado para la sujeción de las placas y mantener el bloque armado, así como algunas conexiones de bronce y manguera de plástico transparente de No. 10, comúnmente utilizado como manguera de nivel.

La segunda propuesta de GH2 presento en base a pruebas realizadas en el laboratorio de energías renovables una notoria generación de gas hidrógeno, esta propuesta dispone de 16 placas de acero galvanizado con las características antes mencionadas, ver [Figura 17].

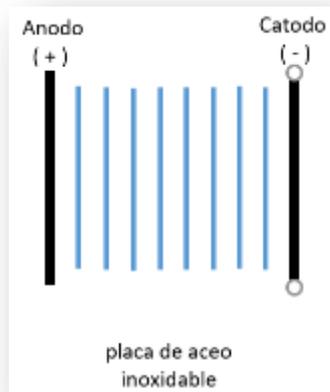


[Figura 17] Imagen del GH2 ensamblado y alimentado con un voltaje

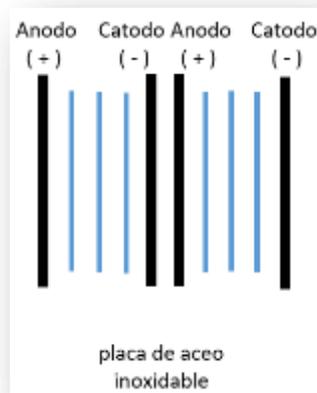
### III.6.2 Propuesta 3°

La siguiente propuesta para la obtención de un GH2, es a base de 19 placas de acero inoxidable, los componentes y trabajos a realizar para la fabricación de este, son idénticos a los ya descritos por lo que omitimos su descripción para fines prácticos y no hacer aburrido el desarrollo de este trabajo de investigación para el lector, lo que a continuación se muestra son las formas de conexión eléctrica pues se aprecia una diferencia en generación al respecto de hacer una conexión en serie y otra muy diferente en conexión en paralelo.

La [Figura 18] representa la conexión en paralelo misma que demostró resultados muy pobres al respecto de la generación de gas hidrógeno, y la [Figura 19], es la representación de una conexión en serie misma que demostró una producción más elevada de gas hidrogeno.



[Figura 18] Conexión en paralelo para el GH2



[Figura 19] Conexión en serie para el GH2

### III.6.3 Procedimiento de la puesta en funcionamiento

Como primer paso se introduce de agua potable al GH2 que se formaron entre los empaque tipo espuma y las placas de acero inoxidable una vez sujetos con la tornillería de acero galvanizado, la cual fue ajustada a mano, de tal manera que el torque aplicado a estos tornillos fuera suficiente para lograr la contención del agua, (simplemente a mano), pues no pudimos utilizar llaves por la presencia de dos placas de acrílico de 6 mm de espesor ubicado en los extremos del GH2, partes importantes del dispositivo de generación, pues permiten observar hacia adentro de las celda y apreciar la generación

de hidrógeno en pequeñas burbujas, además de que permiten observar el nivel de agua en el interior, así como la presencia algunos otros compuestos, como óxido de hierro, esto una vez que el GH2 ya presenta varias horas de generación, esto como resultado de la reacción entre la interacción del agua-acero inoxidable-voltaje.

Las placas de acero A-53 como componente de producción de gas hidrógeno en un GH2, no proveen de este energético, pues durante el desarrollo de este trabajo y bajo condiciones controladas de operación (por 8 hr continuas) no se observó, ni se obtuvo evidencia física de gas hidrógeno, se intentó lograr la producción sin existo, haciendo conexiones de diferentes maneras con variaciones de voltaje y amperaje, lo que demostró que este tipo de acero A - 53, no es apto para la generación de gas hidrógeno.

Para lograr hacer funcionar el GH2 se verifica la presencia de agua potable en todos los compartimentos que componen el generador, pues un mal llenado de agua(electrolito) provoca un mal funcionamiento a nula producción de gas hidrógeno, a continuación se hace la conexión del ánodo y cátodo (en los extremos del GH2), con una fuente de voltaje la cual fue dispuesta a los 12 V y 0.5 A, en su primera prueba disponía de un total de 6 placas de acero inoxidable la cual presento una producción de gas lo suficiente para lograr observa la presencia de gas y se le sometió a una serie de pruebas de generación de gas hidrógeno, se hacen 19 pruebas, (ver [Tabla 3]), con la finalidad de determinar un volumen de gas hidrógeno, contra tiempo cronometrado, teniéndose el siguiente resultado, véase la [Tabla 4], a continuación:

[Tabla 3] Experimentos realizados para generación de gas hidrógeno contra tiempo

	tiempo(s)	volúmen(cm <sup>3</sup> )	tiempo(s)	volúmen(cm <sup>3</sup> )	tiempo(s)	volúmen(cm <sup>3</sup> )
	6 placas		16 placas		19 placas	
Experimento 1)	129	10	66	10	88	10
	235	20	84	20	144	20
	308	30	112	30	191	30
	415	40	139	40	233	40
Experimento 2)	126	10	62	10	85	10
	233	20	80	20	141	20
	304	30	101	30	185	30
	410	40	129	40	229	40
Experimento 3)	124	10	59	10	82	10
	227	20	78	20	138	20
	293	30	93	30	180	30
	401	40	110	40	226	40

*Caracterización y funcionamiento de un generador de Hidrógeno*

Experimento 4)

121	10	53	10	79	10
221	20	73	20	131	20
288	30	88	30	177	30
394	40	99	40	221	40

Experimento 5)

115	10	50	10	76	10
216	20	64	20	127	20
285	30	83	30	171	30
390	40	93	40	215	40

Experimento 6)

113	10	42	10	73	10
205	20	66	20	122	20
284	30	78	30	168	30
383	40	91	40	211	40

Experimento 7)

108	10	40	10	71	10
191	20	64	20	115	20
281	30	84	30	162	30
381	40	86	40	205	40

Experimento 8)

102	10	37	10	68	10
184	20	38	20	111	20
279	30	79	30	159	30
379	40	81	40	201	40

Experimento 9)

94	10	35	10	66	10
180	20	36	20	103	20
278	30	59	30	156	30
378	40	77	40	197	40

Experimento 10)

85	10	30	10	64	10
178	20	35	20	100	20
277	30	56	30	154	30
377	40	75	40	194	40

Experimento 11)

83	10	25	10	59	10
178	20	35	20	97	20
275	30	55	30	152	30
376	40	74	40	193	40

Experimento 12)

79	10	21	10	55	10
174	20	34	20	95	20
274	30	51	30	150	30
376	40	74	40	191	40

Experimento 13)

78	10	20	10	51	10
173	20	33	20	94	20
274	30	51	30	149	30
376	40	73	40	189	40

Experimento 14)

75	10	19	10	48	10
173	20	33	20	93	20
273	30	50	30	148	30
376	40	72	40	188	40

Experimento 15)

73	10	17	10	46	10
172	20	32	20	93	20
272	30	50	30	143	30
375	40	69	40	188	40

Experimento 16)

71	10	16	10	43	10
172	20	32	20	92	20
272	30	49	30	139	30
375	40	68	40	187	40

Experimento 17)

70	10	15	10	41	10
171	20	31	20	92	20
271	30	48	30	137	30
375	40	67	40	187	40

Experimento 18)

70	10	14	10	40	10
170	20	31	20	91	20
271	30	48	30	135	30
375	40	66	40	187	40

Experimento 19)

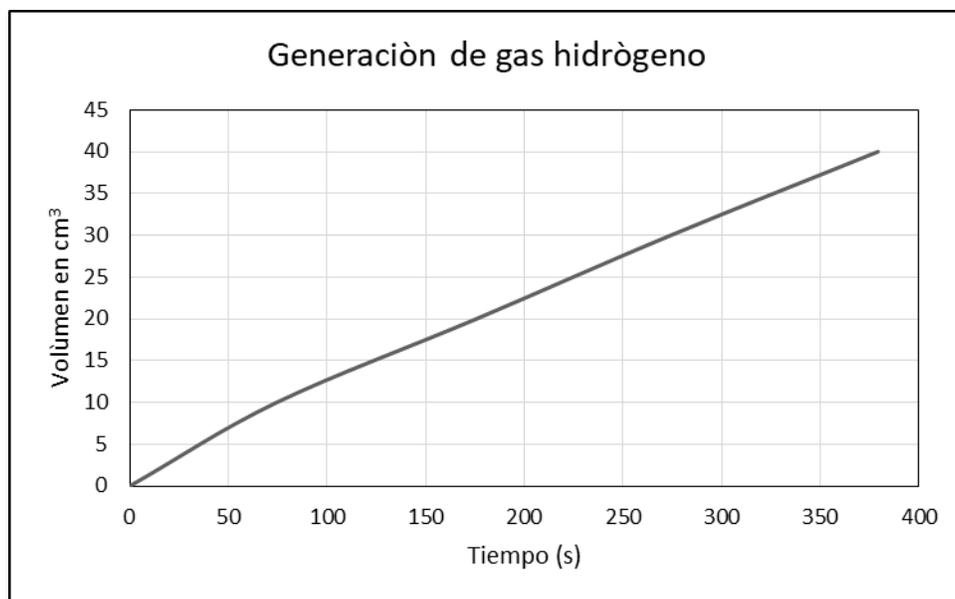
70	10	14	10	40	10
170	20	31	20	91	20
271	30	48	30	135	30
375	40	66	40	187	40

[Tabla 4] Volumen de gas hidrógeno contra tiempo.

Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
70	10
170	20
271	30
375	40

Su representación gráfica fue obtenida con los editores de Excel con la finalidad de observar una línea de tendencia que representa los promedios de las lecturas obtenidas, por lo que se muestra a continuación el resultado obtenido, véase [Figura 20]

En ella se observa una clara tendencia que nos indica que la producción de gas hidrogeno es ascendente, indicativo de que a mayor cantidad de voltaje la producción de hidrogeno se incrementa, aunque a mayor voltaje en el GH2 la temperatura se incrementa significativamente lo que pone en riesgo la integridad de los materiales componentes de la celda, esto claro en los materiales como el acrílico en las paredes exteriores y los empaques de tipo espuma ya mencionados anteriormente.



[Figura 20] grafica, obtenida mediante 19 experimentos realizados en laboratorio

Para poder realizar este experimento fue necesario utilizar un dispositivo para generación electrolítico didáctico que existe en el laboratorio de física, el cual dispone de un contenedor graduado, el cual logra verificar las medidas realizadas, para esto se muestra el dispositivo a continuación, vea [Figura 21]



[Figura 21] imagen del dispositivo didáctico experimental para generación de gas hidrógeno

Por lo que se observa para el Generador de hidrógeno a base de 6 placas de acero inoxidable, alcanzar una producción de  $40 \text{ cm}^3$  de gas hidrógeno, en 375 segundos de funcionamiento continuo.

Por otro lado y una vez determinado el volumen de producción de gas hidrógeno se realizan pruebas en un motor a gasolina, el cual es un motor de 4 tiempos, marca honda de 4 hp.

Las pruebas realizadas en este motor constaron en hacer una comparación con gasolina, con un volumen de 100 ml y tomar el tiempo que le toma agotar el combustible fósil hasta apagarse completamente, el tiempo de prueba realizado promedio fue de 20 minutos, (ver Tabla 5) esto como una serie de pruebas realizadas en el laboratorio de Energías Renovables, el número de pruebas realizadas fueron 16 esto para verificar su rendimiento, las siguientes pruebas fueron además de dotar de los 100 ml de gasolina al motor de combustión fue de colocarle la manguera de plástico de 1/4 " de salida del GH2 e iniciar el ciclo electrolítico a los 12 V y 0.5 A con presencia verificada de gas hidrógeno y después de hacer una serie de pruebas en el laboratorio de energías renovables logramos obtener los siguientes resultados, se tuvo un 25% de rendimiento más con la mezcla de gasolina-hidrógeno, o sea, la serie de pruebas resultó en una duración de 25 minutos en promedio, lo que nos indica que la presencia del gas hidrógeno aportó un extra en tiempo de operación, lo cual verifica las posibilidades de aprovechamiento del hidrógeno.

*Caracterización y funcionamiento de un generador de Hidrógeno*



[Figura 22] imagen del Motor a gasolina sometido a pruebas de consumo

[Tabla 5] comparación de rendimiento en el motor de gasolina contra mezcla de gasolina gas-hidrógeno.

Combustible	Gasolina	Gasolina - Gas H2
Prueba	Tiempo (minutos: segundos)	
1	20:00	25:00
2	20:03	25:04
3	20:05	25:06
4	20:00	25:00
5	19:55	24:96
6	19:59	25:00
7	19:58	24:59
8	19:58	24:58
9	20:00	25:00
10	20:00	25:00
11	20:00	25:00
12	20:01	25:02
13	20:02	25:03
14	20:00	25:00
15	20:00	25:00
16	20:00	25:00

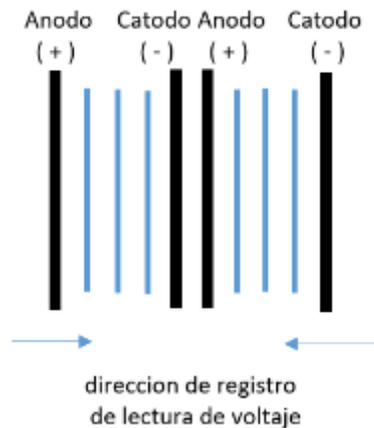
Promedio	20:00	25:00
----------	-------	-------

Con estos resultados podemos observar los tiempos que resultan en funcionamiento producto de introducir en el motor a gasolina un  $1 \text{ cm}^3 / \text{s}$  de gas de hidrógeno, lo que demuestra que su utilización es una alternativa real para hacer de este un sustituto energético. No observando mal funcionamiento, incrementos anormales de temperatura, fallas de funcionamiento típicas en los motores a gasolina como altas o bajas en las revoluciones.

Se logró hacer funcionar un motor a combustión interna con una cantidad de gas hidrógeno de aprox.  $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ , logrando un rendimiento en tiempo de hasta un 25%, por lo que se concluye que este energético en una mezcla a base de Gasolina Premium – Gas hidrógeno, logran ahorros significativos de combustible fósil, se recomienda hacer más pruebas de caracterización y funcionamiento en aras de lograr mayores rendimientos para así demostrar que el gas  $\text{H}_2$  es un energético altamente eficiente.

Por otro lado para verificar el voltaje que le fue introduciendo al GH2, nos apoyamos en un voltímetro de uso múltiple, este dispositivo ayudo en todo momento a verificar la presencia del voltaje observando en la fuente de voltaje utilizado en este experimento.

Las lecturas de voltaje que se obtuvieron en cada una de las placas de acero inoxidable son particularmente interesantes pues presentan lecturas que hace una variación línea de entre 1.45 y 1.50 V, esto como un decremento registrado de los electrodos de conexión ubicados en los extremos del GH2 hacia el interior, observándose esto del ánodo hacia el cátodo, ósea, del polo positivo al polo negativo, visualícese esto en el GH2 conectado en serie como a continuación se muestra, ver [Figura 23] siguiente.



[Figura 23] Conexión del voltímetro en el GH2

Con esto logramos observar que la variación de voltaje es lineal y existe congruencia con la ley de ohm  $\sum V_i = 0$ , después de la toma de varias lecturas logramos este resultado al respecto y que fueron tomadas de los extremos hacia el interior entre cada par de conexiones. Ver [tablas 6,7,8,9]

## Caracterización y funcionamiento de un generador de Hidrógeno

[Tabla 6] Registro de voltajes en las placas de acero inoxidable. (16 placas, cable negro hacia extremo opuesto, rojo.)

Placa	Voltaje (V)
16	12
15	9.4
14	7.1
13	3.9
12	-2.9
11	-5.1
10	-11.8
De la 1 a la 9	0

[Tabla 7] Registro de voltajes en las placas de acero inoxidable. (16 placas, cable rojo hacia extremo opuesto, negro)

Placa	Voltaje (V)
16	1.9
15	3.8
14	6.9
13	8.1
12	10.9
11	15.8
10	17.1
9	19.5
8	23.8
7	0
De la 6 a la 1	12

[Tabla 8] Registro de voltajes en las placas de acero inoxidable.

Placa	Voltaje (V)
16	23.8
15	22.1
14	17.8
13	15.4
12	13.9
11	10.8
10	6.9
9	3.5
8	0
De la 7 a la 1	12

[Tabla 9] Registro de voltajes en las placas de acero inoxidable. (16 placas, cable medio rojo hacía, extremo negro)

Placa	Voltaje (V)
16	-11.9
15	-8.4
14	-5.1
13	-1.1
12	1.2
11	5.2
10	8.6
9	11.8
Del 8 a la 1	0

Al respecto de los registros de temperatura se observó un incremento de temperatura en el GH2, la cual se manifestaba durante el funcionamiento, se verifica que la temperatura se incrementaba proporcionalmente al voltaje, de tal manera que si incrementa el voltaje(muy alto), se hace hervir el agua dentro del GH2, este fenómeno se evidencio para voltajes superiores a los 70 V y amperajes de 1.5 A, por lo que se recomienda tomar precauciones para evitar algún incidente que pusiera en riesgo la integridad física.

Como podemos observar el GH2 basados en placas de acero inoxidable presentan un funcionamiento práctico cuando la conexión eléctrica dispone de un voltaje de 12 V a 0.5 A, siempre y cuando esta sea en conexión en serie, generando cantidades controladas de gas hidrógeno a bajas temperaturas de operación (esto por seguridad de funcionamiento, así como de los equipos que aprovechan el gas H2) lo que hace de este un dispositivo de generación confiable, y seguro.

Se observa para incrementos altos de amperaje, una producción de gas hidrógeno de  $2\text{cm}^3/\text{s}$ (aproximadamente), con el inconveniente de la presencia de incrementos de temperatura altos ( $90^\circ\text{C}$ ), que hacen perder el agua en el interior del GH2 tanto por la temperatura en evaporación, como por sobre-presiones que hacen desalojar el agua por los conductos de salida del gas hidrógeno y entrada del agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) utilizada, lo que compromete seriamente su funcionamiento, por lo que se recomienda hacer pruebas en un trabajo posterior, y diseñar e instalar de un dispositivo de control(a saber) para temperaturas y lograr así de un GH2 con mayor producción de gas hidrógeno.

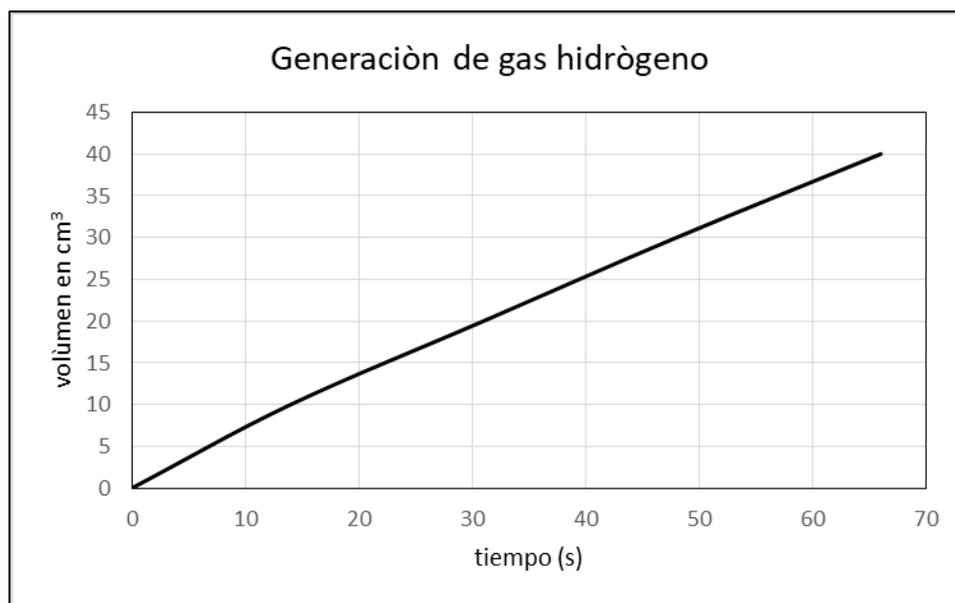
En una segunda propuesta al respecto de la configuración del GH2, también fueron utilizadas las mismas placas de acero inoxidable pero su número fue incrementado hasta las 16 placas, el procedimiento realizado es exactamente el mismo desarrollado anteriormente con la celda de 6 placas, con la salvedad de que este dispositivo de generación energética fue conectado de manera diferente, pues en un principio la celda dispuso del ánodo y el cátodo en sus extremos, dando los resultados atrás descritos, para esta propuesta de 16 placas de acero esta conexión logro resultados muy escasos en lo que respecta a la generación de gas hidrógeno, teniendo números nulos o muy escasos, pero a base de prueba y error se logró hacer funcionar esta con una conexión tipo serie en la cual ahora el generador también dispuesta en torre como en los anteriores experimentos, logro generar un volumen de gas hidrógeno con los números a continuación indicados, vea [Tabla 10],

[Tabla 10] Volumen de gas hidrógeno a 12 V y 0.5 A

Tiempo (s)	Volumen ( $\text{cm}^3$ )
14	10
31	20
48	30
66	40

Para generar esta tabla de resultados y con apoyando en el equipo de generación electrolítico didáctico a resguardo del Laboratorio de Física de la UPT, y como resultado obtenido de 19 experimentos realizados en el laboratorio de Energías Renovables de nuestra casa de estudios, se tomó lecturas en el GH2 y no registrando valores importantes de temperatura, pues todas ellas oscilaban alrededor de la temperatura ambiente que en ese momento era de 23°C mismo que prevalecían en el medio ambiente, a pesar de esto se verifica en el ánodo, o sea, el lado positivo un incremento de temperatura, lo cual fue corroborado con ayuda de termómetros especializados, y a resguardo en los laboratorios de esta casa de estudios, dando incrementos de temperatura de 1°C para este lado del GH2, por lo que se considera que esta no presenta algún problema al respecto de la generación de temperatura lo que la hace segura y confiable tanto para los materiales que la componen como para el uso seguro de las personas y/o personal que esta cargo de su operación.

A continuación, se muestra gráficamente los resultados obtenidos en esta etapa de la experimentación por lo que mostrados las siguiente [Figura 24],



[Figura 24] grafica, obtenida mediante 19 experimentos realizados en laboratorio

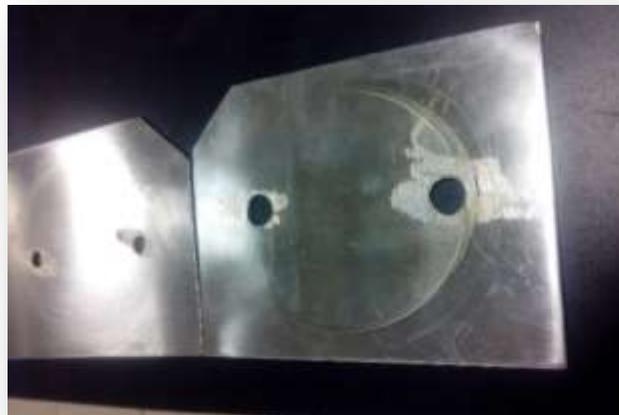
Estos resultados son particularmente interesantes pues con respecto a los obtenidos en el experimento anterior observando para los mismos volúmenes de gas de hidrogeno a lograr, medidos en el laboratorio de Energías Renovables, se observa menos tiempo al dispositivo de generación lograr esto, e incluso como evidencia se muestran las pendientes de las ecuaciones de ajuste, presentándose para este último experimento y con una simple observación se precisa esta última propuesta en más de cinco veces el volumen de producción de gas hidrógeno, lo que indica claramente que el volumen de gas

hidrógeno a obtener es función directa del número de placas de acero inoxidable, aunque se observó que el volumen de gas hidrógeno también es función de la corriente inducida al generador de hidrógeno, pero con la inconveniencia que se genera calor, que pone en riesgo la estabilidad, operatividad, y funcionalidad del GH2.

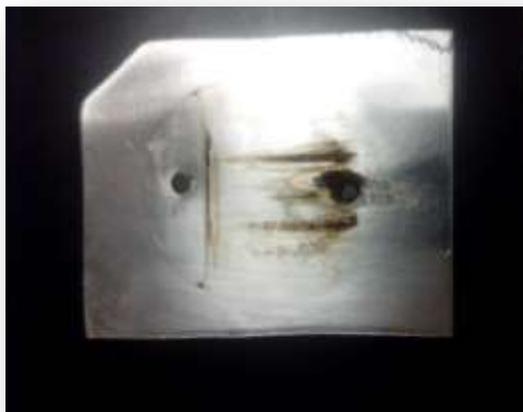
Por lo que se observa para el Generador de hidrógeno a base de 16 placas de acero inoxidable, alcanzar una producción de 40 cm<sup>3</sup> de gas hidrógeno, en 66 segundos de funcionamiento continuo.

#### **III.6.4 Inspección del GH2, posterior al funcionamiento**

En esta etapa del experimento realizado con el GH2 se observaron manchas que indican presencia de corrosión, esto como reacción del voltaje y la intensidad de corriente utilizada, cabe hacer mención que no se consideran graves pues casi todas ellas se limpian de la placa de acero utilizada con agua y jabón, las que mayor presencia de este fenómeno presentan son las placas ubicadas en el ánodo positivo, y para su limpieza total se necesita hacer un trabajo mayor con una lija para metal del No. 600, logra una superficie limpia totalmente, sin presencia de manchas de cualquier índole, lo que nos indica que el trabajo que desempeña el GH2 es durable y económico pues no es necesario hacer remplazos de placas de acero inoxidable por corrosión, para ello observar las siguiente [Figura 25] y [Figura 26] de algunas placas de acero inoxidable utilizadas en el GH2.



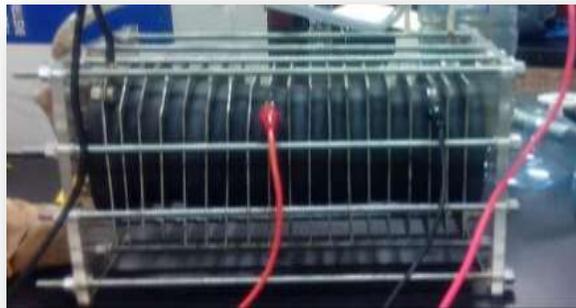
[Figura 25] imagen de Placas de acero inoxidable



[Figura 26] imagen de placa de acero inoxidable, calibre 24

En una segunda propuesta y para mejorar el funcionamiento del GH2 y en base a los resultados obtenidos evidentes en las gráficas de generación de gas hidrógeno, una propuesta para el desarrollo de este trabajo es incrementar las placas de acero inoxidable, las cuales fueron provistas con las características similares a las utilizadas anteriormente, pues fueron introducidas con las mismas características de calidad. Esta ocasión para continuar con la experimentación se anexaron 3 placas más de acero, con lo cual se espera un mayor volumen de generación de gas hidrógeno, el cual fue habilitado en el laboratorio de Energías Renovables cumpliendo con los estándares ya establecidos, y con la finalidad de lograr un sistema de generación igual, para esto se realizó el mismo procedimiento de trabajo y experimentación utilizado en el ejercicio anterior.

Continuando con la experimentación para una tercera propuesta del GH2 con 19 placas de acero inoxidable con las mismas características ya descritas anteriormente. Al parecer la producción de gas hidrógeno depende hasta el momento y en base a la evidencia obtenida, del número de placas, y del voltaje inducido, pues según se observó en las gráficas de generación anteriormente mostradas se evidencia esto, observar la [Figura 27]



[Figura 27] imagen del GH2 de 19 placas

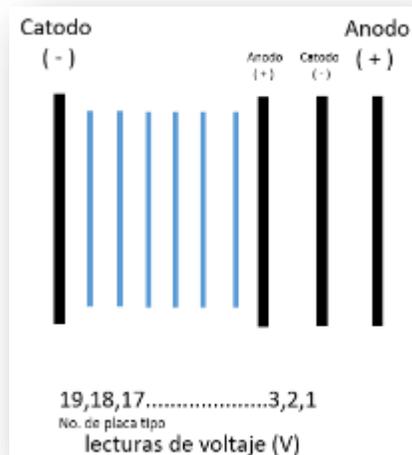
Cabe señalar que para esta etapa de experimentación las condiciones de operación y para hacer una certeza de referencia se hace circular un voltaje de 12 Volts y 0.5 Amperios, tal y como se a desarrollado el experimento anterior con las otras propuestas del GH2, el tiempo de operación al que se experimentó con el GH2, fue por un tiempo total de 96 hr continuas sin interrupciones eléctrica, incluso día y noche (funcionamiento continuo).

### **III.6.5 Experimentación del GH2 con 19 placas de acero inoxidable (3° propuesta)**

La experimentación en el GH2, y debido a la presencia de variaciones de voltaje que oscilaban entre valores positivos y negativos, mostrados anteriormente en tablas de generación para la obtención de

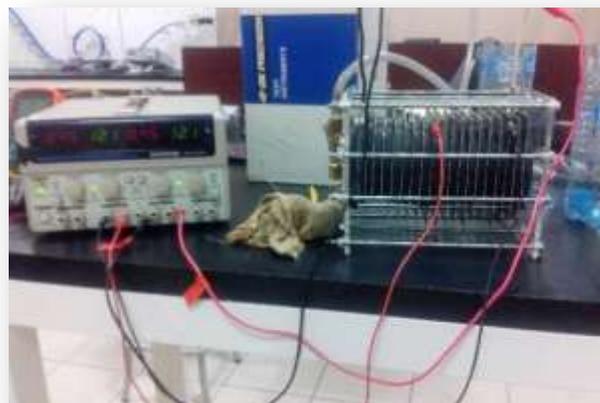
gas hidrógeno, y pues de manera puramente empírica realizamos una serie de conexiones, de tal manera que observamos lo siguiente.

Cuando se hace la conexión en los extremos, por un lado el ánodo y en el otro extremo el cátodo y para continuar con la conexión en serie anteriormente ya mostrada, se realizó una conexión en serie del lado ánodo a lado cátodo, (ver siguiente [Figura 28]), se observa la presencia de un voltaje constante, o sea, 12 V y 0.5 A se mantuvo a todo lo largo del GH2(verificándose la lectura de voltaje placa por placa de acero inoxidable), sin registrar variaciones apreciables con la resolución del voltímetro que utilizamos para realizar este experimento, ya mostrado anteriormente.



[Figura 28] GH2 a 12 V y 0.5 A conexión extremo

Se anexa imagen de la conexión física entre la fuente de voltaje y el GH2 relativo al procedimiento anteriormente descrito, ver [Figura 29]



[Figura 29] imagen de Conexión en serie del GH2, en extremos izquierdo

Continuando con la experimentación dentro del marco de generación del gas hidrógeno en el GH2 y continuando con la caracterización de este y en base a los resultados obtenidos, mostrados anteriormente de este reporte, se observa que al parecer la cantidad de gas hidrógeno obtenido es proporcional al número placas de acero inoxidable, voltaje y/o por consecuencia al amperaje también,

es por ello que se tomó la decisión de incrementar el número de placas de acero inoxidable, y someterla a las mismas condiciones de operación, o sea, con ayuda de la fuente de voltaje resguardada en el laboratorio de Energías Renovables se vuelve a conectar el GH2, un voltaje de 12 V y un amperaje de 0.5 A, esto para hacer una real comparación de resultados.

Con respecto a la conexión en el GH2, se observa en base a pruebas realizadas que está hecha en serie proporciona una generación de gas hidrógeno notoria, y constante, esto es, que si se conecta en paralelo la producción de gas hidrogeno es muy escaza o nula, no es apreciable a simple vista la generación de gas hidrógeno, esto ha sido una constante en los anteriores experimentos realizados hasta el momento, la conexión dispuestas se muestra a continuación, vea la [Figura 30].



[Figura 30] imagen del GH2, disponiendo conexión en serie

### **III.6.6 Caracterización del GH2, Voltaje y Amperaje.**

Las fuentes utilizadas para hacer circular el voltaje de 12 V y 0.5 A, en el GH2, y congruente con la conexión en serie antes mencionada, indicando ambas los datos de voltaje y amperaje, lo que en un principio dirige a pensar que todo el GH2 está funcionando con las mismas condiciones de voltaje y amperaje, por lo que antes de proceder con el siguiente experimento se verifican los voltajes a los que están sometidas cada placa de acero inoxidable del GH2, por lo que a continuación se muestran en estos resultados en la siguiente, [Tabla 11]:

[Tabla 11] Número de placa de acero inoxidable contra voltaje

Placa	Voltaje (V)
19	12
18	0
17	-12
16	-9.4
15	-7.4
14	-6.4
13	-5
12	-3.8
11	-2
10	-1.2
De la 9 a la 1	0

Una vez verificada las condiciones de trabajo a las que estaría sometido el GH2 se cuantifica el volumen de gas, este experimento fue realizado en dos etapas, pues como primer punto se debe esperar un tiempo de aproximadamente 1 hr para que la producción de gas hidrógeno se estabilice, pues se observa que durante este tiempo el GH2 presenta variaciones en tiempo y volumen de producción en un sentido creciente, o sea, se observa que la producción de gas hidrógeno es función del tiempo.

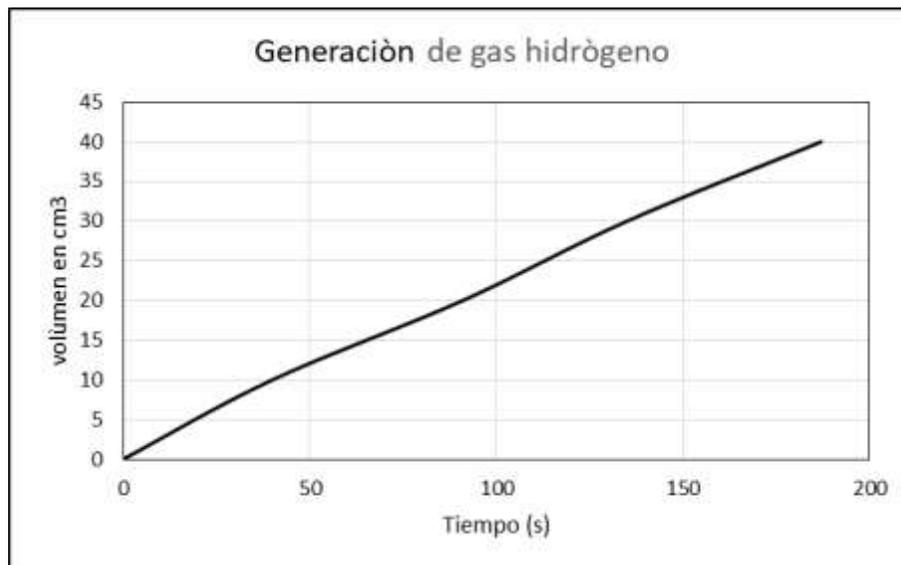
Por otra parte, el dispositivo utilizado para verificar esta producción de gas hidrógeno es el mismo modelo didáctico de generación de gas hidrógeno a resguardo en el laboratorio de Física de esta casa de estudios mencionado y mostrado anteriormente, por lo que omitimos presentar nuevamente su imagen.

Después de realizar una estadística de 15 experimentos se llegó finalmente a los resultados mostrados y obtenidos, (pues de continuar se observan los mismos números de generación), y como un promedio de los datos obtenidos durante esta experimentación, vea la [Tabla 12] que a continuación se muestra,

[Tabla 12] Obtención de gas hidrógeno del GH2, de 19 placas de acero inoxidable

Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
40	10
91	20
135	30
187	40

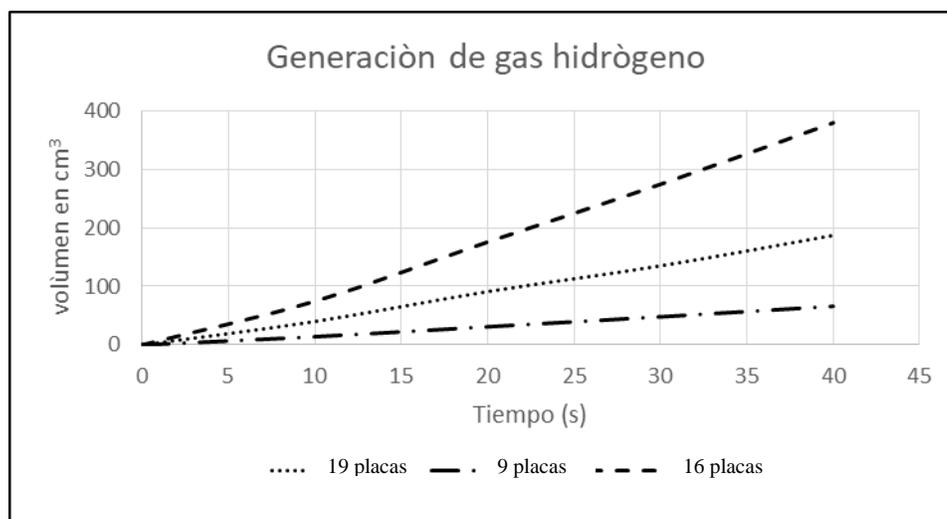
A continuación, se presenta la gráfica de los valores mostrados en la [Tabla 12] en el editor de programa de Windows Excel y resulta lo que se muestra en el gráfico [Figura 31], mostrando claramente una pendiente positiva lo que indica un aumento sostenido de producción de gas hidrógeno mostrando incluso el ajuste de una recta con una pendiente positiva.



[Figura 31] grafica, obtenida mediante 19 experimentos realizados en laboratorio

Por lo que se observa para el Generador de hidrógeno a base de 19 placas de acero inoxidable, alcanza una producción de 40 cm<sup>3</sup> de gas hidrógeno, en 187 segundos de funcionamiento continuo.

A manera de observar los resultados obtenidos y derivado de la experimentación realizada mencionada en este trabajo de investigación, podemos observar en conjunto la generación de gas hidrógeno en la siguiente [Figura 32] donde podemos visualizar el comportamiento entre las tres configuraciones de placas de acero inoxidable los que podemos observar para la configuración a base de 16 placas de acero inoxidable presenta el mayor volumen de producción y así mismo podemos visualizar que el generador de 6 placas de acero inoxidable es la que presento un menor volumen de generación, ver [Figura 32]



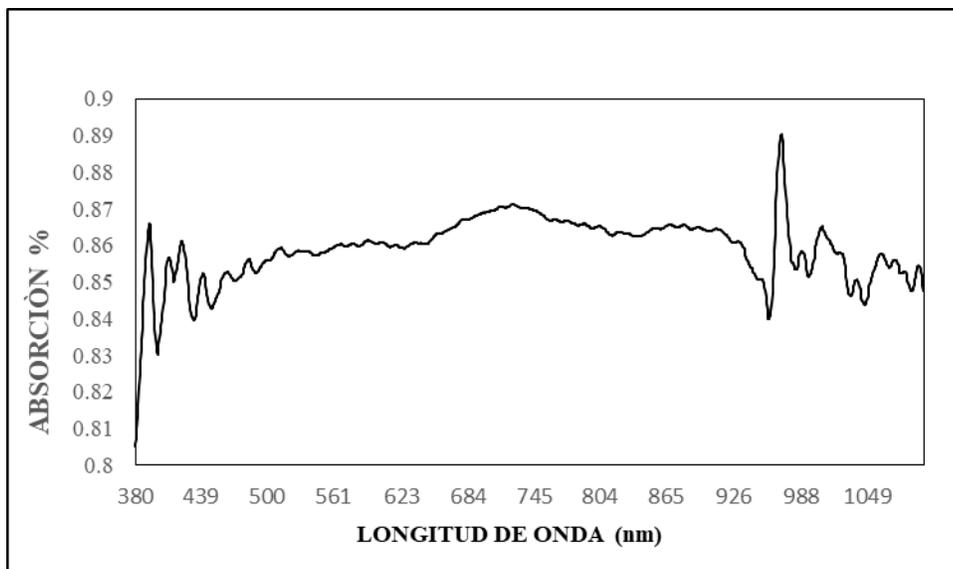
[Figura 32] Grafica que muestra la generación del GH2 con 9, 16, y 19 placas de acero inoxidable

Una vez concluidas las pruebas de experimentación descritas en páginas anteriores podemos, se observa para el GH2 un funcionamiento continuo dentro de los tiempos utilizados para su caracterización, lo que evidencia un dispositivo de uso práctico, requiriendo de un mantenimientos sencillos y económicos, pues el generador al estar compuesto principalmente de placas de acero inoxidable, lo hace verdaderamente durable, la calidad del agua utilizada como requisito mínimo es que sea agua potable sin tener que utilizar agua destilada o algún componente adicional.

### III.7 Espectroscopia del hidrógeno

Como parte de la caracterización del GH2, motivo del tema de este trabajo de investigación, fue solicitado al laboratorio de óptica de esta casa de estudios, un aprueba de espectroscopia para el gas hidrógeno, la cual tiene la finalidad de verificar la presencia del gas hidrógeno, pues a pesar de que mediante pruebas explosivas se verifica la presencia de este gas en su producto resultante, se realizaron dos prácticas con la finalidad de establecer un parámetro mutuamente comparativo.

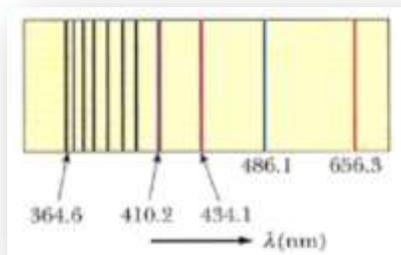
La primera fue realizada con una burbuja de gas hidrógeno (a saber), encapsulada en jabón líquido para manos, y la segunda fue realizada en un vaso de precipitados con una capacidad de 900 ml, el cual fue sometido a un haz de luz y un extremo de fibra como receptor de emisiones espectroscópicas, ambas pruebas duraron aproximadamente 30 minutos, el tiempo incluye la calibración correspondiente para ajuste del medio físico en el que se encuentra la burbuja de gas, pues la solución que se utilizó para contener el gas hidrógeno presenta sus propios parámetros de difracción, los resultados obtenidos fueron alentadores pues consultando literatura al respecto se encontró coincidencia en lo que respecta a la longitud de onda  $\lambda$ (lamma), a continuación se muestra el espectro obtenido como resultado, en el cual se muestra la longitud de onda para la cual se presentan los picos, consecuencia de la difusión de los átomos de hidrógeno, ver [Figura 33]



[Figura 33] espectroscopia del hidrógeno

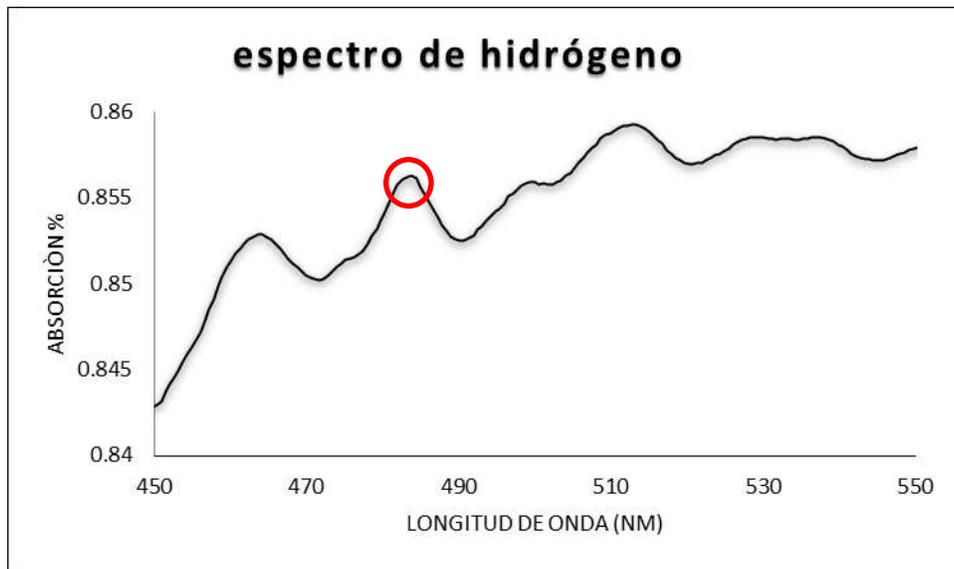
En esta gráfica se muestran varios picos donde difunde el hidrógeno y que nos permite verificar la presencia de este combustible natural.

Realizando una comparación con los puntos obtenidos, y en base a pruebas de difusión del hidrógeno previamente establecidas, realizadas en otros trabajos de investigación como por ejemplo el publicado por Federico Dos Reis y Alfredo Daniel Sánchez, que lleva por nombre “ESPECTROSCOPIA”<sup>[22]</sup>, en el cual el resultado de su investigación presenta los valores de longitud de onda en nanómetros (nm), y para el cual colocamos su resultado en una imagen vea la siguiente [Figura 34]



[Figura 34] Espectro del hidrógeno <sup>[22]</sup>

Como es evidente en la gráfica antes obtenida no es posible visualizar los picos que muestran las coincidencias que nos permitan verificar la presencia del hidrógeno dentro de la burbuja, por lo que se procede a hacer más visual los puntos donde debería hacer difusión el hidrógeno por lo que se acota un tramo como lo vemos en la imagen anterior el valor 486 nm ( $\text{nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$ ), por lo que sensibilizando nuestra visión podemos hacer coincidir este valor “preestablecido” con el obtenido durante esta prueba.



[Figura 35] imagen del resultado de Espectroscopia del hidrógeno, realizado en laboratorios de la UPT

En esta imagen se observan las áreas que respecta al círculo rojo (de contorno) la coincidencia que en buena medida y con un pequeño error visual que pudiese ocurrir debido a circunstancias no previstas y que para las cuales los valores obtenidos en la prueba de espectroscopia realizada en el laboratorio de Óptica coinciden con los valores obtenidos en el experimento realizado por los autores “Federico Dos Reis y Alfredo Daniel Sánchez”, y publicado en su artículo que lleva por nombre, “ESPECTROSCOPIA”,<sup>[22]</sup> con lo cual se verifica la presencia de hidrógeno.

### III.8 Balance de potencia

Como se observó en el desarrollo de este trabajo de investigación, y recordando para hacer funcionar el generador de gas hidrógeno se introdujeron 12 V a 0.5 A con la fuente de voltaje mostrada en el capítulo III, y recordando el concepto de potencia eléctrica es:

$$\text{Potencia eléctrica} = \text{Voltaje} \times \text{Corriente} \dots\dots\dots\text{III-1}$$

Por lo que aplicando esta idea y bajo este criterio podemos obtener una potencia eléctrica de generada por la fuente de voltaje de:

Potencia eléctrica = 12 V x 0.5 A = 6 Watt [W] .....III-2

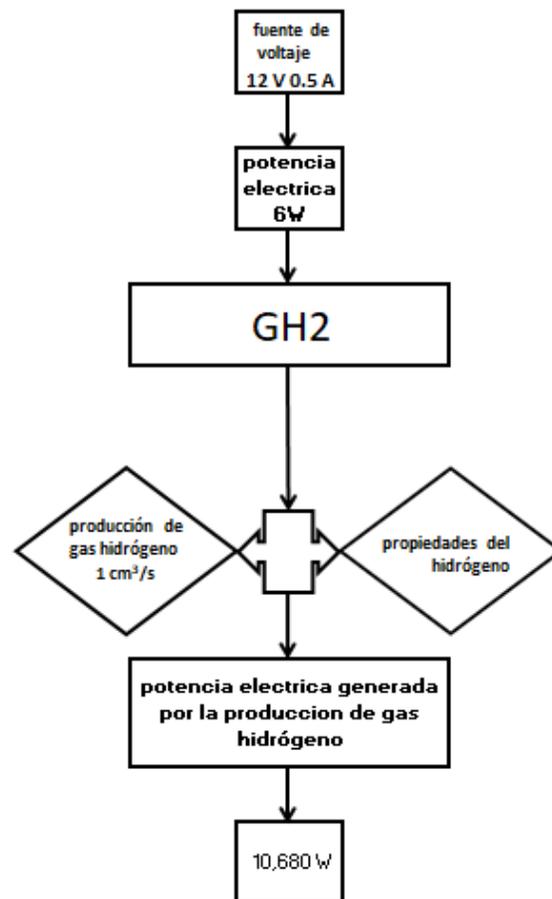
Ahora bien, haciendo referencia a los datos citados por la referencia [15] utilizada en este trabajo de investigación citados en la [tabla 1] ubicada en la página 14, podemos observar que el hidrogeno posee una densidad energética de 120 kJ/g, así como una densidad de masa de 0.089 g/cm<sup>3</sup>, por lo que haciendo las operaciones para determinar la potencia que se puede obtener del gas hidrógeno obtenido durante el desarrollo de este trabajo de investigación, en el entendido de que si se logró una generación de gas hidrógeno de 1 cm<sup>3</sup>/s, por lo que procediendo con algunas operaciones básicas podemos demostrar que:

Potencia eléctrica (gas H2) = (densidad energética) x (densidad de masa) x (generación de H2)  
.....III-3

Por lo que sustituyendo en la ecuación anterior obtenemos el siguiente dato:

Potencia eléctrica (gas H2) = 120 kJ/g x 0.089 g/cm<sup>3</sup> x 1 cm<sup>3</sup>/s = 10,680 J/s = 10,680 W .....III-4

Por lo que podemos observar que la potencia eléctrica requerida por la fuente de voltaje es de 6 W, mientras que la potencia que se genera con la producción de gas hidrógeno del GH2, caracterizado en este trabajo de investigación y que recordando esta, de 1 cm<sup>3</sup>/s, por lo que logramos analizar un número que demuestra su funcionamiento en el entendido de un logro energético positivo.



[Figura 36] diagrama de flujo de la generación de potencia inducida por la fuente de voltaje y generada por la producción de gas hidrógeno del GH2.

## Capítulo IV

# Conclusiones

Al respecto de los modos de conexión se observa para lograr una mejor producción de gas hidrogeno es en serie, pues hacen de la caracterización una posibilidad para su estudio y entendimiento, en aras de un mejor funcionamiento.

El hidrógeno como primer elemento creado en el Universo y diseñado como un energético, cumple tal función, esto es, de proveer energía de funcionamiento mecánico (por citar alguno de sus usos conocidos). En este trabajo de investigación se evidencia, la obtención de este energético en su forma de gas, lo cual se logró comprobar de manera experimental e incluso dar algunas aplicaciones prácticas, se identifica la presencia de gas hidrógeno mediante explosiones controladas, así como de manera cualitativa y cuantitativa, se logró confrontar que los generadores de hidrógeno GH2 a base de placas de acero inoxidable con agua simple y un voltaje con un amperaje determinado,(a esto le llaman “electrolisis”)<sup>[15]</sup> hacen un trabajo de producción eficiente, e incluso, debido a la caracterización del GH2 y mediante la experimentación realizada se puede observar la producción de gas hidrógeno, pues la tablas y figuras mostradas en el capítulo III así lo muestran.

Cabe resaltar que la caracterización del GH2 fue realizado dentro de una serie de pruebas y experimentos que se evidencias en las tablas y graficas en el capítulo III, mostradas en el desarrollo de este reporte experimental.

En base a los resultados de producción de gas hidrógeno de las propuestas mostradas en este trabajo de investigación, se observa un ritmo de producción de gas hidrógeno ascendente, lo que significa, que estos dispositivos de generación abren la posibilidad de hacer proporcionalidades entre sus dimensiones y su producción de gas hidrógeno.

Al respecto de la caracterización y funcionamiento del GH2, se observa que para incrementos de amperaje (A), no es posible hacer esto con seguridad, pues el funcionamiento del generador se compromete con respecto de la producción de gas hidrógeno, y registrándose incrementos de temperatura en el generador haciendo latente riesgo de funcionamiento del GH2, así como la seguridad de los operarios de esta.

Los GH2 construidos a base de placas de acero A-53 no producen gas hidrógeno.

El gas hidrógeno puede ser parte de una mezcla con combustibles fósiles, con la finalidad de hacer funcionar motores de combustión interna, logrando incrementos de funcionamiento de hasta un 25% en tiempo de operación.

El objetivo de este trabajo de investigación fue caracterizar y puesta en funcionamiento de un generador de hidrógeno de 9 x 14 cm, por lo que para la celda a base de 9 placas se logra una generación de gas hidrógeno de 40 centímetros cúbicos en un tiempo de 375 segundos, para el generador a base de 16 placas en un tiempo de 66 segundos y para el caso de 19 placas un tiempo de 187 segundos.

### **Trabajos futuro**

Realizar más pruebas en motores de combustión interna (vehículos compactos, motocicletas, máquinas de uso residencial) de tal manera que se logre una optimización en el aprovechamiento y funcionamiento con gas hidrógeno, estos como una alternativa energética.

Al respecto del almacenamiento del gas hidrógeno, y en aras de un futuro prometedor se necesita investigar técnicas y/o tecnologías, que lo hagan posible (económicas), pues las formas de almacenamiento actuales resultan muy costosas, pues no olvidemos, que en la medida que logremos esto podremos hacer del hidrógeno un combustible más de uso común, y solo así el hidrógeno podrá competir contra los energéticos fósiles, que por costumbre y/o necesidad seguimos utilizando.

Caracterización, diseño y funcionamiento de un generador de gas hidrógeno de mayores dimensiones que se espera genere grandes cantidades de gas.

## ANEXOS

# Bibliografía

- [1] Palmer, David (13 de septiembre). “Hydrogen in the Universe”. NASA.
- [3] Fuel Cell Technology Handbook. CRC Press. 2002. ISBN 142004155X, 9781420041552.
- [4] “Powering Our Future, An Energy Sourcebook for Sustainable living, Smith Kimberly K., New York, 2005, U.S.A.
- [5] Gil, J.E.G. Rey, Á.O.D., & Gonzalez – Estrada, O., A., (2018), Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. Revista UIS Ingenierías.
- [6] International Energy Agency, World Energy Outlook 2002, OECD/IEA, Paris, 2002.
- [7] Arenas, A., Linares, J.I.: Nuevos desarrollos en automoción y transporte (I/IV) 1ª parte. “Introducción”, Anales de Mecánica y Electricidad, octubre 2003.
- [8] High Level Group, Hydrogen Energy and Fuel Cells. A Vision of Our Future. Final Report, EUR 207 19 EN, 2003 (W 1).
- [9] Garrido F.A. & Yi. V.M., Celdas de combustible, Una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación de potencia y su impacto en el desarrollo sostenible de Colombia en el siglo XXI, Ingeniería y desarrollo, 2001
- [10] Sosa M.I., & Fushimi A., La cogeneración en el contexto de las tecnologías de conversión energética del futuro AVERMA, avances en energías renovables y medio ambiente, 2000
- [11] Laborde M.A., Lombardo E.A. Noronha F.B., & Boaventura Filho J.S., Potencialidades del hidrógeno como vector de energía en IberoAmérica, Buenos Aires, 2010.
- [12] Holgado Secas H., Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrógeno por electrolisis, 2012.
- [13] Familiar Xauduro C., Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales, 2011.
- [14] Méndez G.B., & Monroy C.C., Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales, Uman. mx. Revista Digital Universitaria, 2009
- [15] Mortilla Soria Beatriz Yolanda y Linares Hurtado José Ignacio, El hidrógeno y la energía, Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Madrid, ISBN: 978-84-932772-9-1,

## Referencias web

[2] <http://www.walesonline.co.uk/news/wales-news/welsh-history-month-william-robert-1836995>

[16] Asociación Española de Pilas de Combustible (APPICE)

[17] <http://www.reitec.es/Pdf/agua01.pdf>

[18] <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1287279>

[19] <http://www.rnh2.org/4.html>

[20] [http://www.coopservi.es/documentacion/index\\_htm\\_files/Grove.pdf](http://www.coopservi.es/documentacion/index_htm_files/Grove.pdf)

[21] <https://ibero.mx/campus/publicaciones/quimanal/pdf/7reaccionesredox.pdf>

[22] [http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5\\_1er2011/G5Espectroscopia.pdf](http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/G5Espectroscopia.pdf)