

**Celda Electrolítica Para La Producción De Hidrógeno.
(CIN2012A10143)**

Centro de Integración Educativa A.C.

Autores

Alvarado Martínez Abraham.
Byrd Victorica Mauricio.
Garcés Hernández Luis Fernando.

Asesor

Alejandro Segovia Hernández.

Área de conocimiento

Ciencias Biológicas, Químicas y de la Salud

Disciplina

Química

Tipo de investigación

Experimental

Lugar y fecha

Centro de integración Educativa, Febrero 2013



ÍNDICE

	Página
1. Resumen y Abstract	3
2. Introducción	5
3. Objetivo General y Específicos	6
4. Fundamentación Teórica	7
5. Metodología de la Investigación	13
6. Resultados	16
7. Conclusiones	20
8. Referencias	21
9. Anexos	22



RESUMEN

Este experimento busca afrontar la problemática mundial originada por la intensiva explotación del medio ambiente a fin de obtener recursos energéticos. Para ello, se sustituyó a los hidrocarburos convencionales por hidrógeno como fuente sustentable de energía. Como método de obtención de este elemento fue usado el proceso de electrolisis (específicamente la del agua). Durante el desarrollo de la experimentación se fue estableciendo que la producción depende principalmente del tiempo y la concentración de iones en la mezcla donde se llevó a cabo el proceso electrolítico, es decir, la producción de hidrógeno aumenta conforme estos dos factores lo hacen. En el proceso de experimentación se pudo determinar que el hidrógeno supera a dos de los combustibles más importantes (gasolina y butano) en la actualidad en términos de capacidad energética, además de que se realizó un análisis acerca del costo y la producción energética de cada uno. El desarrollo de dicho dispositivo ha sido planeado para obtener la mayor cantidad de rendimiento y establecer un proceso sustentable y renovable que implique poca o nula nocividad al medio ambiente.

ABSTRACT

This experiment seeks to confront the worldwide problematic originated by the intensive exploitation of the environment in order to obtain energetic resources. For this, conventional hydrocarbons were replaced by hydrogen as a sustainable energy source. The method used for this element's obtaining was the process of electrolysis (specifically on water). During the development of the experimentation, the production's main dependence on time and on the mixture's ionic concentration (the mixture where the electrolytic process was executed) was established; this means that the hydrogen production increases as these two factors do. It was also determined during experimentation process that hydrogen overcomes two of the most important fuels (gasoline and butane) nowadays in terms of energetic capacity, besides an analysis about each cost and energetic production was grasped. The development of such dispositive has been planned to obtain the highest amount of performance and



to establish a sustainable and renewable process which implies a reduced or null damage to the environment.

INTRODUCCIÓN

El enfoque de nuestro experimento está motivado por la progresiva insuficiencia energética, y el exceso de contaminación que produce, tanto la extracción como el consumo de los hidrocarburos, base principal del consumo energético mundial. La función imprescindible que el petróleo ha desempeñado a lo largo de la historia contemporánea se ha visto entorpecida por la inevitable extinción de éste. Por ello, es primordial evaluar y desarrollar alternativas de fuentes energéticas cuya producción y uso no implique una repercusión nociva para el medio ambiente, además de ser sustentables y renovables. Cálculos recientes, publicados por la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), indican que para el 2037 se registrarán las primeras fallas del suministro mundial del hidrocarburo (Friedman).

Una de las sustancias que presentan una mayor cantidad de aprovechamiento energético es el hidrógeno. Sin embargo, la alta volatilidad de éste ha limitado su uso comercial intenso. En general, el petróleo produce 42 gigajoules por cada tonelada, pero el hidrógeno produce 132 gigajoules por la misma cantidad (Gueveros). Por lo tanto, se postula como una de las energías alternas más viables y con mayor contenido energético con el fin del petróleo como fuente principal de energía.

Existen diversas maneras de obtener hidrógeno, pero una de las más utilizadas es la electrólisis. Las ventajas que otorga este método son su sencillo desarrollo y su alto rendimiento, sin embargo su costo es elevado: el uso del hidrógeno como combustible puede acabar con la crisis energética en la que se vive actualmente.

Por ello, el propósito de este proyecto es crear un dispositivo generador de una fuente energética que posea la capacidad de producir una mayor cantidad de energía con respecto al



petróleo por unidad de volumen, de no emitir agentes contaminantes, y que su accesibilidad económica se equipare o, incluso, supere la del hidrocarburo.

Con base en conocimientos previos, pudimos determinar ciertas hipótesis que podrían optimizar el funcionamiento del dispositivo que se creó. La primera indica que el poder calorífico de los combustibles fósiles se ve entorpecido por su reducida capacidad de almacenamiento energético, entonces, el hidrógeno al no poseer dicha dificultad, tendrá un mayor poder calorífico.

Con respecto a la capacidad energética del hidrógeno pudimos suponer que el agua requiere de una gran cantidad de energía tanto para formarse, como para disociarse, entonces el hidrógeno, al ser el vector energético con mayor capacidad de almacenamiento, retendrá la mayor parte de esta energía, ya que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma.

Para la optimización en la obtención de hidrógeno establecimos que si los compuestos iónicos, cuando se encuentran disueltos, tienen la propiedad de aumentar la conductividad eléctrica de la disolución entera o transmitir una mayor cantidad de energía eléctrica entre las moléculas del disolvente, por ello, al aumentar la concentración del soluto en la mezcla, la electrólisis se dará de una manera más rápida y producirá una mayor cantidad de hidrógeno.

En cuanto a la cantidad que podemos esperar de la electrólisis, ya que es un proceso cuyo efecto (disociación), al no cambiar las condiciones, es constante, entonces la duración del fenómeno determinará la cantidad de producto final obtenido. Por lo tanto, el tiempo del proceso electrolítico es directamente proporcional a la cantidad de hidrógeno conseguido.

Las propiedades del hidrógeno pudieron determinar que su uso es una opción viable para alternativas energéticas. El hidrógeno (H) es un elemento químico que, en condiciones ambientales normales, se encuentra como un gas ligero formado por moléculas diatómicas. El hidrógeno es el elemento más ligero y a temperaturas elevadas es una de las sustancias más inflamables que existen,



así como uno de los recursos con mayor contenido energético por unidad de masa, el cual es 120 MJ/Kg, esto lo posiciona en el mejor de los combustibles conocidos. Por esta razón es que ha recibido mucha atención en los últimos años.

Su explotación como fuente de energía representa uno de los avances más provechosos en este rubro. Pues, aunque no se encuentra libre en la naturaleza, su obtención, al igual que los productos refinados, requiere una cierta inversión de recursos, estos medios son mayoritariamente sustentables. Así mismo el valor de este recurso se incrementa ya que su uso para generación de electricidad, en dispositivos de conversión de energía, como las celdas de combustible, permiten un mejor aprovechamiento del contenido energético, debido a la alta eficiencia de conversión, de 40% a 75%, según tipo de celda.

Pese a las útiles propiedades del hidrógeno, este no se puede considerar, en sí, una fuente energética. Más bien se le considera un transportador energético, o un vector energético, ya que complementa perfectamente a la electricidad para almacenar y transportar la energía. Un vector que almacena energía, para posteriormente poder liberarla.

La obtención de este elemento, como ya se ha mencionado, es por medios muy viables y sustentables, sin embargo éstos no implican un método de producción menos complejo. Existen varias tecnologías capaces de producir el hidrógeno. Desde su obtención por medio de insumos de hidrocarburos, hasta las basadas en fuentes netamente renovables. Los procesos siempre implican aislar el hidrógeno de algún material, para almacenarlo y posteriormente utilizarlo en los diversos empleos energéticos.

Los métodos para obtener hidrógeno, son procesos fisicoquímicos que implican la implementación de recursos previos que en su composición contengan hidrógeno. Uno de los recursos con mayor posibilidad de generar hidrógeno es el agua. Y uno de los procesos por los cuales



se puede separar el hidrógeno es mediante la electrólisis. La electrólisis consiste en descomponer el agua en los gases oxígeno (O_2) e hidrógeno (H_2) por medio de una corriente eléctrica.

OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

Nuestro primer objetivo fue realizar un dispositivo que sea capaz de producir hidrógeno empleando el proceso de electrólisis en una solución iónica de agua, cuya energía sea suministrada por una fuente eléctrica de corriente alterna.

Posteriormente este dispositivo sería sometido para comparar la efectividad de los recursos económicos destinados a la producción de hidrógeno del dispositivo creado con respecto a otros dos combustibles (gasolina y butano), comparando también la cantidad de calor producido.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La base teórica sobre la cual dispusimos la creación del dispositivo se fue recopilando desde los primeros intentos para el uso del hidrógeno. El desarrollo de tecnologías que tienen como base el hidrógeno, se han implementado desde el siglo XIX. En sus inicios dicha tecnología carecía de verdaderos sustentos tecnológicos, así como implementaciones para el desarrollo aplicado en la producción de energía convencional. Los primeros avances en una celda de hidrógeno, en estricto sentido, fueron realizados en 1838, cuando el científico Christian Friedrich Schönbein descubrió el principio del funcionamiento de la propia celda (Flores). Estas investigaciones fueron publicadas en enero del siguiente año en la revista "Philosophical Magazine", hecho por el cual pudo continuar con el avance en diversas investigaciones hasta el punto de desarrollar nitrocelulosa. Esto con la oxidación lenta del fósforo blanco y la electrólisis del agua.



Posteriormente, y con base en las investigaciones de Schönbein, Sir William Grove, un científico galés, pudo implementar el primer modelo de una célula de combustible, utilizando materiales similares a los usados para la célula de ácido fosfórico, pero no fue hasta 1940 cuando, Francis Thomas Bacon desarrolló una celda doble. Usando dos unidades: la primera como fuente para la generación de hidrógeno, y la segunda para el uso propio de pila de combustible. Con esta tecnología logró utilizar la pila como una unidad reversible, es decir, que lo podía usar como electrolizador (unidad para realizar la electrólisis) y como pila de combustible.

El progreso de sus investigaciones fue en 1959 cuando desarrolló con éxito la primera célula estacionaria de combustible. En un principio aplicó los avances que había hecho anteriormente Grove, utilizando platino activado como los electrodos y ácido sulfúrico como el electrolito. Posteriormente cambió los materiales, sustituyendo a los electrodos con níquel activado, y al electrolito con una solución acuosa de hidróxido de potasio.

A pesar de estos avances, aunado a las investigaciones de Bacon, la compañía General Electric desarrolló la primera pila de membrana de intercambio de protones, unidad funcional que usaba el hidrógeno para la producción de energía eléctrica. Este aparato fue desarrollado para ser utilizado en las misiones espaciales Gemini de la NASA (*Ciencia@NASA.*).

A partir de este hecho, las celdas de hidrógeno fueron utilizadas en los años noventa en programas espaciales, debido al alto costo que representaba su uso comercial. Sin embargo en la década de los ochenta y noventa, las celdas de combustible se convirtieron en una opción real para uso más amplio. Gracias al desarrollo de innovaciones como el uso de un catalizador con menos platino, o electrodos de película fina, fue posible que los costos de las celdas bajaran, y con ello se impulsó la implementación de estos equipos en diversas y más prácticas aplicaciones.

Las investigaciones que se ciernen sobre este tema no son de un trasfondo caduco, por el contrario, representan grandes progresos para la tecnología, tanto espacial como la que se usa en



nuestra cotidianeidad. Así como avances en la comprensión de los propios procesos fisicoquímicos que se presentan en torno a estos dispositivos. En el año 2007, Gerhard Ertl, un físico alemán, fue condecorado con el premio Nobel de química debido a sus investigaciones en torno a cómo funcionan las pilas de combustible. Los inicios de sus investigaciones comenzaron en la década de los sesenta. Gerhard Ertl fue uno de los primeros científicos en ver y desarrollar el potencial de las nuevas técnicas surgidas a partir de los procesos implementados en la industria de los semiconductores en esta década. Las exploraciones que comenzó a hacer fueron referidas a un proceso conocido como Haber-Bosch, en el cual se extrae nitrógeno del aire para su inclusión en los fertilizantes artificiales.

Los experimentos de este físico alemán requirieron el uso de avanzados equipos para la realización de estudios en un vacío casi total, para cumplir objetivos como observar el comportamiento de las capas de átomos individuales y de las moléculas sobre la superficie de un metal extremadamente puro. Según el comunicado sobre las investigaciones de Gerhard Ertl, éstas son útiles "para la industria química y pueden ayudar a entender procesos tan variados como por qué se oxida el acero, cómo funcionan las pilas de combustible o cómo actúan los catalizadores en nuestros automóviles" (Ciencia@NASA).

En las celdas de hidrógeno existen dos generalidades o tipos de las mismas. La primera sólo constituye un implemento por el cual es posible obtener el hidrógeno. La segunda es útil para la transformación del hidrógeno en energía. Ambas pueden funcionar a partir de una misma fuente primaria, que es el agua. Sin embargo estos dos implementos para la celda pueden complementarse y por lo tanto optimizar el proceso de obtención de energía.

Los dispositivos especializados en la transformación del hidrógeno en combustible pueden ser conocidos como celda, célula o pila de combustible, el cual se considera un módulo electroquímico. Debido a que es utilizado como fuente directa de energía, este aparato posee características similares a las pilas convencionales, con la diferencia de que las celdas de hidrógeno permiten el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos. Este dispositivo es capaz de producir



electricidad a partir de una fuente externa de combustible y de oxígeno, así como hacer que sus electrodos sean catalíticos y relativamente estables. Uno de los ejemplos fundamentales e importantes de una celda de combustible es la celda de hidrógeno/oxígeno, que tienen como materia prima el agua y son usadas en misiones espaciales. Las ventajas que presenta este sistema es la alta densidad de corriente de intercambio de la reacción de hidrógeno. Desafortunadamente, la reacción del oxígeno tiene una baja densidad de corriente de intercambio. Sin embargo una de las formas para inhibir esta dificultad es utilizando una superficie catalítica, con un área superficial amplia.

La celda de combustible consiste en dos electrodos separados por un electrólito. Dicha disposición de los dispositivos permite que el oxígeno pase sobre un electrodo y el hidrógeno sobre el otro. Cuando el hidrógeno es ionizado pierde un electrón y al ocurrir esto ambos (hidrógeno y electrón) toman diferentes caminos hacia el segundo electrodo. El hidrógeno migra hacia el otro electrodo a través del electrólito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor. Este proceso producirá agua, corriente eléctrica y calor útil. Para generar cantidades utilizables de corriente las celdas de combustibles son "amontonadas" en un emparedado de varias capas.

El principio que se utiliza en una celda de combustible es generar electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente sin ninguna combustión. Entre las ventajas que ofrece esta tecnología es su constante reabastecimiento, es decir, la fuente por la cual se obtiene la materia prima para la producción de este tipo de energía no se agota ni requiere de una renovación posterior al inicio de su producción. Producirá energía en forma de electricidad y calor mientras se le provea de combustible. El único subproducto que se genera es agua 100% pura.

Esta celda de combustible ha demostrado ser muy útil para sistemas combinados de calor y energía. Dichos sistemas de calor disipado se utilizan, entre otras cosas, para edificios o para realizar trabajo. La eficiencia de una planta de estos sistemas puede alcanzar el ochenta por ciento. La potencia de las baterías de estas celdas ha alcanzado el orden de 10MW.



En segundo lugar se encuentra la celda especializada sólo en la obtención de hidrógeno, la cual también es conocida como célula electrolítica, debido al proceso de electrólisis que lleva a cabo, proceso que se explicara más adelante. En este dispositivo dos electrodos están en contacto con una disolución iónica en el que, gracias a las reacciones de oxidación-reducción que tienen lugar en su interior, se da un intercambio de energía. Estos electrodos son incididos por una corriente eléctrica externa. Esta célula es la encargada directa de generar hidrógeno, el cual se obtiene en su estado gaseoso, lo cual hace necesario su almacenamiento para posteriormente utilizarlo. El uso para el que se puede emplear, en el estado de agregación que se encuentra el hidrógeno, es como combustible, y como ya se ha mencionado antes, el hidrógeno es el mejor combustible que se haya encontrado.

Para la obtención de hidrógeno a partir de este tipo de celda, es necesario el uso de un proceso fisicoquímico conocido como electrólisis. Este proceso implica dos elementos: un electrolito, sustancia que contiene iones libres, los cuales se comportan como un medio conductor eléctrico; y un electrodo, que es una sustancia especializada en conducir electricidad y por lo tanto suministra o atrae electrones a un medio. La combinación de estos dos elementos, al encontrarse ambos en disolución y bajo la acción de una corriente eléctrica continua, induce reacciones de oxidación-reducción no espontáneas.

En el caso más específico, el proceso electrolítico que se lleva a cabo en una celda electrolítica, como la que se presenta en este experimento, es una electrólisis específica al agua. Esta tiene como fin el descomponer el agua (H_2O) en los gases oxígeno (O_2) e hidrógeno (H_2) por medio de la corriente eléctrica propia de una electrólisis. En este proceso, se coloca una fuente de energía eléctrica, conectada a dos electrodos, o dos platos (típicamente hechos de algún metal inerte como el platino o el acero inoxidable), los cuales son puestos en el agua.

La electrólisis es un proceso fisicoquímico de descomposición de una o varias sustancias en iones por medio de una corriente eléctrica continua. Ésta fue descubierta accidentalmente por



William Nicholson y Anthony Carlisle en 1800 mientras estudiaban el funcionamiento de las baterías (Flores). Para su desarrollo, la electrólisis necesita de dos electrodos conectados a una corriente directa de electricidad que pueda ser conducida por un electrolito.

Debido a la atención que llamó el proceso electrolítico en 1834, un científico inglés, conocido como Michael Faraday, intentó explicar y dar relaciones cuantificables y comprobables del fenómeno (Flores). Es por ello que en el mismo año, tras repetir el experimento, determinó dos leyes, las cuales explican las relaciones entre los fenómenos que se presentan en la electrólisis. Dichas leyes se conocen como las Leyes de Faraday para la electrólisis, para el funcionamiento de este dispositivo se tomó en cuenta la Primera ley de Faraday de la electrólisis, la cual dice que: la masa de los elementos separados por el paso de una corriente eléctrica directa a través de una sal disuelta o fundida es proporcional a la cantidad de carga eléctrica que pasa por el circuito (Atkins y Levine).

La primera ley estipula que una corriente de mucha intensidad, que circule a través del electrolito durante mucho tiempo, depositará más sustancia que una corriente débil que actúe durante un tiempo corto. La segunda ley propone que cuando la misma corriente circula durante el mismo tiempo, las cantidades de sustancia depositadas dependerán de su peso equivalente.

La base funcional de la electrólisis es, como ya se ha mencionado, la disociación, es decir la separación de la misma en moléculas más pequeñas.

De entre los elementos que componen al fenómeno se encuentran el electrolito, que básicamente es una sustancia que, al encontrarse disuelta o fundida, tiene la capacidad de conducir la corriente eléctrica. Éstos están formados por iones de diferentes cargas: aniones y cationes. Los aniones son iones los cuales han ganado uno o más electrones y, por lo tanto, poseen una carga negativa. Por otra parte, los cationes son iones que se forman al perder uno o más electrones y poseen una carga positiva. Los electrolitos, en la electrólisis, son los encargados de transmitir la corriente eléctrica en todo el sistema. Dependiendo de la magnitud de su constante de ionización, los electrolitos pueden ser considerados fuertes o débiles, es decir, la capacidad que tienen éstos de



disociarse. Entre mayor sea la constante de ionización de un electrolito, mayor será la transferencia de energía eléctrica y la cantidad de producto final obtenido. Los electrolitos más fuertes suelen ser compuestos iónicos.

Por otra parte, los electrodos son los conductores eléctricos por los cuales se suministran o atraen los electrones a un medio definido. Normalmente se dividen en dos: los de carga negativa y los de carga positiva. Los electrodos de carga negativa se conocen como cátodos, éstos, en la electrólisis, se cargan de electrones cuando reciben energía de la corriente eléctrica y atraen a los cationes del electrolito, neutralizándolos. Mientras que los electrodos de carga positiva se conocen como ánodos. Los ánodos, en el momento en que reciben la corriente eléctrica, pierden electrones, por lo que su estado de oxidación aumenta, atrayendo a los aniones del electrolito y neutralizándolos.

Al resultado de la electrólisis del agua es una mezcla de hidrógeno diatómico y oxígeno en proporción que se asume de 2:1, misma proporción del agua, y es conocida como oxihidrógeno. Cuando esta mezcla se enciende, la combustión produce agua y 142.35 kJ (34.116 kilocalorías) de calor por cada gramo de hidrógeno quemado.

Uno de los factores claros de este proyecto se centra en el calor, o la energía calorífica. No obstante, el concepto de calor debe entenderse como el medio por el que la energía se transfiere, ya que el calor se manifiesta debido a una diferencia de temperatura. La energía, en forma de calor, disipada por los distintos sistemas en experimentación, es una energía conocida como energía térmica. Esta energía es la que produce calor, esto debido a los movimientos aleatorios de átomos y moléculas de los sistemas. La obtención de este tipo de energía requiere la energía cinética de un sistema, ya que es una energía que inmediatamente produce calor.

El uso de ese tipo de energía es cuantificado en los tres experimentos. Los primeros dos son una muestra comparable entre la energía del hidrógeno y la desprendida por los primeros dos sistemas. Al compararse estos experimentos se lleva a cabo el uso de la energía térmica.



conductor y se pelan las puntas resultantes, en ellas se conecta el voltímetro y se pelan las puntas del otro extremo.

El segundo procedimiento fue la propia construcción de la celda. Para ello se realiza una perforación de $\frac{1}{4}$ in de diámetro a las placas de acero en la parte A (cuya superficie abarca el área comprendida por el cuadrado formado tras el corte) con posición en (0.5in, 0.5in). Así mismo se hacen dos perforaciones de $\frac{5}{16}$ in de diámetro a las placas en la parte B (cuya superficie abarca el área comprendida por el rectángulo resultante al suprimir la parte A), cuyas coordenadas sean (1.5cm, 1.5cm) y (6.1cm, 1.5cm), para introducir los tornillos de $\frac{5}{16}$ in en los agujeros correspondientes de una placa. Insertar un empaque en cada tornillo de tal forma que presione la placa contra el tornillo.

A continuación se introduce otra placa en los tornillos de tal forma que la parte A se ubique en posición inversa a la de la primera placa. Insertar los empaques correspondientes. Este procedimiento se repite con el resto de las placas, y en cada caso se introduce en cada tornillo una roldana y su respectiva tuerca. Se debe asegurar fuertemente.

Después se introduce un tornillo de $\frac{1}{4}$ in en su respectivo orificio de tal forma que atraviese las placas cuya parte A se encuentre en una posición similar a la primera placa en contacto e insertar entre cada una de ellas dos empaques. Se repite este paso, introduciendo el tornillo en el sentido contrario. Se aseguran ambos tornillos con su tuerca correspondiente.

Posteriormente se enrolla un extremo del cable dúplex en el espacio del tornillo ubicado tras la tuerca. Después se introduce la roldana de acero y se asegura con la mariposa, esto se hace en ambos lados.

El tercer procedimiento implica el funcionamiento de la celda, el cual inicia añadiendo 7L de agua de llave en el recipiente de plástico, también se agregan después 3Kg de cloruro de sodio y se agitar hasta alcanzar el punto de saturación del agua.



Posteriormente se sumerge el vaso de precipitados de 1L en la solución del recipiente hasta que esté completamente lleno de ésta. La celda, sin conectarla, se introduce en el vaso de precipitados de tal forma que la boca de éste se encuentre en contacto con el recipiente.

Se conecta la celda verificando, mediante el voltímetro, que existe un paso de corriente en el circuito. Se deben esperar cinco días después de haber puesto en funcionamiento el dispositivo.

A los cinco días se mide el volumen de la mezcla de hidrógeno y oxígeno, para calcular la relación que hubo entre la producción de gas y el tiempo, en mL por hora.

Para demostrar el funcionamiento del hidrógeno, se arma el soporte universal, y en el vaso de precipitados de 250mL se vierten 100g de agua destilada, se debe medir su temperatura anteriormente.

Se conecta la manguera del mechero de Bunsen a un embudo y se coloca debajo del vaso de precipitados. Por este medio se debe transferir el gas obtenido del vaso de precipitados de 1L al mechero a través del embudo. Encenderlo.

Finalmente se debe medir la temperatura del agua cuando el gas obtenido se haya agotado, para desechar el agua se debe dejar enfriar. Posteriormente se repiten estos pasos y se hacen los cálculos correspondientes, tales como calcular la cantidad de hidrógeno existente en la mezcla, calcular el cociente del calor producido entre el volumen, para esto es necesario utilizar cada caso. Y obtener el valor medio del poder calorífico del hidrógeno.

Los materiales utilizados para la construcción total de la celda se enlistan a continuación:

Materiales	Equipo	Sustancias	Equipo de seguridad
10 placas de acero	1 voltímetro	7L de agua de	Bata





inoxidable con medidas de 3x3in y un corte en un extremo de 2x1in.		la llave	
2 tornillos de plástico 5/16	1 mechero	3Kg de cloruro de sodio (NaCl)	Cofia
36 empaques	1 termometro	1L de gasolina	Guantes de electricista
1.5m cable dúplex de calibre 12	1 encendedor	10L de gas butano (C ₄ H ₁₀)	
2 tornillos de acero de ¼	1 balanza	100g de algodón comercial	
2 mariposas de acero inoxidable			
1 recipiente de plástico			
1 clavija			
2 tuercas de 5/16			
2 tuercas de ¼			
4 roldanas de plástico de 5/16			
4 roldanas de acero de ¼			
1m de manguera			
1 vaso de precipitados de 1L			
1 vaso de precipitados de 250ml			
1 agitador			



1 soporte universal
completo
1 envase de gerber
1 llave de paso de gas

Al producirse hidróxido de sodio en este experimento, debe ser neutralizado con un ácido lo suficientemente potente. La manera en que hay que neutralizarlo es con ácido clorhídrico hasta que el carácter de la mezcla sea neutro. Lo que se genera es agua y cloruro de sodio lo que es neutro. El agua con sal puede ser depositada en el lavadero o ser conservado.

RESULTADOS

La construcción de la celda partió de un diseño cuyas características optimizaban la obtención del hidrógeno por medio de la electrólisis. Para su montaje se requirió de una inversión de mil pesos con los cuales se adquirieron ciertos materiales que cumplieran las necesidades del dispositivo. La parte más importante en su estructura son las placas de acero inoxidable, éstas cuentan con la función de distribuir la energía eléctrica de tal manera que el área abarcada (en contacto con la energía) produce un aumento en la velocidad del proceso electrolítico. Se escogieron estas placas debido a que el acero inoxidable es un buen conductor eléctrico, además de ser inerte, por lo que el agua no afecta su composición. Asimismo, en estas placas se lleva a cabo el intercambio de electrones cuyo efecto es la disociación del agua.

Para poder unir las placas se necesitó de tornillos de plástico, debido a que su propiedad aislante evita que los distintos polos de las placas se mantengan en contacto, impidiendo que el circuito se cierre y habilitando la separación de los iones. Además, se utilizó una diferente clase de tornillo, hecho de acero inoxidable, por el cual se suministra la energía eléctrica a las placas. Esta energía proviene de la conexión entre los tornillos y los extremos del circuito. El calibre del cable de



este circuito tiene un valor de 12, lo cual representa un valor alto, y, por lo tanto, posee una gran capacidad para resistir altos voltajes y el contacto con el agua.

Con el propósito de conocer el voltaje dirigido a través del circuito se empleó una conexión directa de un voltímetro a este. De esta manera también se conoció el valor resistencia que representaba la celda. Dichos datos se utilizaron en las mediciones de energía obtenida y poder calorífico. La posición de las placas fue pensada de esa manera, es decir, con la parte A invertida sucesivamente entre cada una, para proveer a la mitad de éstas de una carga eléctrica y a la otra mitad de la carga contraria.

Para incorporar todo este sistema en el medio acuoso (mezcla de agua y cloruro de sodio) requerido, se utilizó un recipiente de alta capacidad volumétrica, el cual facilitó la transferencia de hidrógeno cuando fue necesaria y la medición del mismo y del gas butano. Por último, se dispuso un vaso de precipitados para la recolección de hidrógeno producido por la celda.

La forma en que se lleva a cabo el proceso electrolítico en la celda es a partir del intercambio de electrones dado en las placas. Este intercambio es posible gracias a la disolución iónica que optimiza la conductividad eléctrica en el medio, es decir, el electrolito. La electrólisis es una reacción de oxidación-reducción donde el catión ha perdido electrones, y por ello se dirige al cátodo, al cual la corriente eléctrica le otorga electrones. Éste es el proceso de reducción. Mientras que la oxidación es aquella donde el anión, desestabilizado por la ganancia de electrones, se dirige al ánodo al cuál le faltan electrones. En la celda los electrodos son las placas de acero inoxidable. En ella el hidrógeno florece como el catión en la reacción, por lo tanto este tiende a ganar electrones para lograr la estabilidad, por el contrario el cloro es el catión tiende a ceder los electrones del cátodo para lograr la estabilidad. Además de producirse hidrógeno y cloro, quedan libres el catión sodio y el anión hidróxido, los cuales no se oxidan ni se reducen, sino que se unen para formar el compuesto estable hidróxido de sodio.



Las placas cambian de función catódica y anódica inconstantemente debido a que la corriente que pasa por ellas es alterna. Si la corriente que pasara fuera directa los polos nunca cambiarían de posición. El hecho de que el ánodo y el cátodo se mantengan en un mismo lugar hace más efectivo el proceso.

La segunda ley de Faraday establece que la masa del producto disociado es proporcional a su peso equivalente, es decir, la cantidad en moles del ion en la mezcla. Por lo tanto, se puede deducir que entre mayor cantidad de iones existentes en la mezcla, habrá una mayor cantidad de elementos disociados. Además de depender de la cantidad de iones, la producción de hidrógeno es dependiente de la cantidad de compuesto iónico que se encuentra disuelto en la mezcla. Esto se debe a que el compuesto aumenta la conductividad en el sistema, por lo cual se transmite una mayor cantidad de electricidad. En la experimentación, al aumentar la concentración de cloruro de sodio, la producción de hidrógeno aumentó considerablemente.

De acuerdo con la primera ley de Faraday, la carga eléctrica es también un factor que afecta la disociación de los iones, es por ello que si se mantiene una carga eléctrica constante, la producción no variará. En este caso se mantuvo la carga eléctrica constante por un determinado tiempo, la celda probó consumir doce volteos por cada minuto y tener una resistencia de 3Ω . Con estos datos, se observó que la energía eléctrica utilizada por la celda depende del tiempo. El registro de la producción de hidrógeno permitió conocer la cantidad de hidrógeno que se generaba por unidad de energía eléctrica.

El poder calorífico es la cantidad de energía que posee por unidad de masa un material. Este se calculó a través de un calorímetro, en el cual se usaba una cierta masa o volumen de combustible para elevar la temperatura una determinada cantidad de agua. La energía producida se obtuvo a través de la fórmula de calor sensible. Posteriormente se calculó el cociente entre la masa o volumen utilizado, obteniendo el poder calorífico o densidad calorífica. Finalmente se utilizó la densidad de



cada sustancia para calcular el poder calorífico o la densidad calorífica faltante para los casos correspondientes.

Respecto al poder calorífico, el hidrógeno, fue la sustancia que produjo una mayor cantidad de energía térmica por unidad de masa, esto se debe a su gran capacidad de absorción de energía. No obstante, en la densidad energética la gasolina fue mayor comparada a los otros dos combustibles, esto debido a que su densidad es representativamente mayor, por lo que posee una mayor cantidad de masa por unidad de volumen.

Tanto para el butano como la gasolina, se obtuvo el costo por caloría con respecto al volumen. El precio usado es el vigente, con esto se obtuvo que el rendimiento de la gasolina es superior al del butano. Posteriormente se hicieron cálculos para determinar el precio de la producción de un cm^3 de hidrógeno. Para ello se utilizó la tarifa normal de Kilowatt hora. Obteniendo que el precio de un cm^3 de hidrógeno es más alto con respecto a los otros combustibles. Esto se debe a que se necesita una gran cantidad de energía para disociar el agua y a que se utilizó corriente alterna en lugar de corriente directa. Al final, con respecto al costo, la gasolina resultó ser el mejor combustible.

Sin embargo, al ser el hidrógeno el combustible con una mayor cantidad de poder calorífico, se postula como la energía alterna más viable, ya que no desprende agentes contaminantes. Además la abundancia del hidrógeno en el universo lo hace un combustible renovable, a diferencia de la gasolina, cuya existencia está limitada. La abundancia del hidrógeno también permite su producción en cualquier medio. Claro que primero hay que reducir el costo de su producción y la lentitud del proceso, problemas que aparentemente están próximos a ser resueltos debido a los NUMEROSOS métodos de obtención.

CONCLUSIONES



Con este análisis, llegamos a las conclusiones siguientes: Con la celda se cumplió parcialmente el objetivo, ya que, en efecto se produce una mayor cantidad de calor por unidad de masa a través de un combustible que no emite agentes contaminantes, sin embargo, su costo de producción fue demasiado alto en comparación al de la gasolina y el butano.

Por otro lado, el hidrógeno es un buen combustible debido a que tiene la capacidad de absorber una gran cantidad de energía, por lo que su poder calorífico es muy alto. Sin embargo, la cantidad de hidrógeno en volumen obtenido no fue la esperada, debido a que su producción se realizó a partir del uso de corriente alterna en lugar de directa, por lo cual los polos de la celda cambiaban durante la electrólisis inconstantemente, lo que propició su lenta producción. Debido que la electrólisis es un proceso por el cual se disocian varios iones de una sustancia a través del paso de una corriente eléctrica por un electrolito, ésta se produce por una reacción de oxido-reducción en la cual se da un intercambio de electrones.

Se probó que la concentración de compuestos iónicos en la mezcla es proporcional a la energía eléctrica transmitida en ésta, por lo tanto es proporcional a la producción de hidrógeno. La densidad energética del hidrógeno y del gas butano fue demasiado pequeña en comparación a la de la gasolina, debido a que la masa que poseen por unidad de volumen es muy reducida.

Debido a que la existencia de agua dulce se encuentra en niveles críticos, es de mayor conveniencia utilizar aguas marinas para realizar la electrólisis. Es importante considerar este punto ya que este tipo de agua contiene sales disueltas que propician la transmisión de la electricidad entre las moléculas de agua y, como ya se estableció antes, entre mayor sea la cantidad de iones, mayor la producción. Sin embargo, la composición de las mezclas marinas no puede ser controlada si no es por purificación, por lo tanto los productos finales obtenidos no siempre serán los que el investigador desee o espere. Este inconveniente, finalmente, puede dañar el resultado final del proceso.

El hidrógeno se proyecta como uno de los combustibles con mayor efectividad en la producción de energía y menor daño al ambiente en la combustión.



REFERENCIAS

- Buenfil Friedman, Andrés. "Cuando se acabe el petróleo". *La Jornada*. Domingo 30 Oct. 2005. Masiosare. (Andrés Buenfil Friedman es doctor en análisis de energía y sistemas ecológicos por la Universidad de Florida).
- *Diccionario Esencial: Química*. México D.F.: Larousse, 2006.
- *Diccionario Esencial: Física*. México D.F.: Larousse, 2006.
- Levine, Ira N. *Fisicoquímica Vol. 2*. Madrid: McGraw-Hill, 2004.
- Atknis, Peter y Julio de Paula. *Química Física*. Buenos Aires: Médica Panamericana, 2008.
- "Células frías de combustible". *Ciencia@NASA*. < [http://ciencia.nasa.gov/science-at-asa/2003/18mar_fuel cell/](http://ciencia.nasa.gov/science-at-asa/2003/18mar_fuel%20cell/)> 10 nov. 2012.
- Gueveros Sánchez, María Esther. "El Hidrógeno como Alternativa Energética del Futuro". *Esther Gueveros*. 15 mar. 2003. <<http://estherguervos.galeon.com/2ha.pdf>> 25 nov. 2012.
- Flores Montejano, Adelaido y Héctor A. Domínguez Álvarez. *Pioneros de la Física*. México D.F.: Trillas, 2004.

ANEXOS



Reacción:

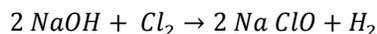
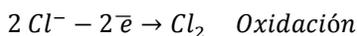
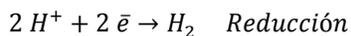


Tabla 1. Calor obtenido con la combustión de la gasolina.

Gasolina utilizada (g)	Masa del agua (g)	Temperatura inicial del agua (°C)	Temperatura final del agua (°C)	Calor específico del agua (cal/g°C)
1.7	143	16	24	1
3.2	143	21	35	1
3.8	143	16	33	1

$$Q = mc\Delta T$$

$$Q_1 = (143 \text{ g}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \right) (24^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C}) = 1144 \text{ cal}$$

$$\text{Poder calorífico} = P = \frac{Q}{m} = \frac{1144 \text{ cal}}{1.7 \text{ g}} = 672.94 \text{ cal/g}$$

$$\rho_{\text{gasolina}} = \frac{m}{v} = 0.624 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \text{ por lo tanto } m = v\rho$$

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{1.7 \text{ g}}{0.624 \text{ g/cm}^3} = 2.72 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad energética} = \rho_e = \frac{Q}{v} = \frac{1144 \text{ cal}}{2.72 \times 10^{-3} \text{ L}} = 420588.2353 \text{ cal/L}$$

$$Q_2 = (143 \text{ g}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \right) (35^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C}) = 2002 \text{ cal}$$

$$\text{Poder calorífico} = P = \frac{Q}{m} = \frac{2002 \text{ cal}}{3.2 \text{ g}} = 625.625 \text{ cal/g}$$

$$\rho_{\text{gasolina}} = \frac{m}{v} = 0.624 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \text{ por lo tanto } m = v\rho$$



$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{3.2 \text{ g}}{0.624 \text{ g/cm}^3} = 5.12 \text{ cm}^3$$

$$\rho_e = \frac{Q}{v} = \frac{2002 \text{ cal}}{5.12 \times 10^{-3} \text{ L}} = 391015.625 \text{ cal/L}$$

$$Q_3 = (143 \text{ g}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \right) (33^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C}) = 2431 \text{ cal}$$

$$\text{Poder calorífico} = P = \frac{Q}{m} = \frac{2431 \text{ cal}}{3.8 \text{ g}} = 639.73 \text{ cal/g}$$

$$\rho_{\text{gasolina}} = \frac{m}{v} = 0.624 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \text{ por lo tanto } m = v\rho$$

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{3.8 \text{ g}}{0.624 \text{ g/cm}^3} = 6.08 \text{ cm}^3$$

$$\rho_e = \frac{Q}{v} = \frac{2431 \text{ cal}}{6.08 \times 10^{-3} \text{ L}} = 399835.52 \text{ cal/L}$$

Tabla 2. Poder calorífico de la gasolina.

Intento	Poder calorífico (cal/g)	Densidad energética (cal/L)
1	672.94	420588.2353
2	625.625	391015.625
3	639.73	399835.52

$$\text{Valor medio de la densidad energética} \frac{\text{cal}}{\text{L}} = \frac{420588.2353 + 391015.625 + 399835.52}{3} = 403813.184 \text{ cal/L}$$

$$\text{Valor medio del poder calorífico en} \frac{\text{cal}}{\text{g}} = \frac{672.94 + 625.625 + 639.73}{3} = 646.0983 \text{ cal/g}$$

Costo por litro de la Gasolina Premium= 11.28 pesos.

$$\text{Redimiento energético por costo} = \frac{403813.184 \text{ cal}}{11.28 \text{ pesos}} = 35799.04 \text{ cal/peso}$$

Tabla 3. Flujo volumétrico del gas butano.

Intento	Tiempo (s)	Volumen (cm ³)
1	14	200



2	15	220
3	13	180

$$\text{Valor medio del tiempo} = \frac{14s + 15s + 13s}{3} = 14s$$

$$\text{Valor medio del volumen en cm}^3 = \frac{220 + 200 + 180}{3} = 200 \text{ cm}^3$$

$$\text{Flujo volumétrico} = \frac{v}{t} = \frac{200 \text{ cm}^3}{14 \text{ s}} = 14.28 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Tabla 4. Calor obtenido con la combustión del gas butano.

Tiempo en que se utilizó el butano (s)	Masa del agua (g)	Temperatura inicial del agua (°C)	Temperatura final del agua (°C)	Calor específico del agua (cal/g°C)
151	100	25	55	1
220	100	11	55	1
177	100	20	55	1

$$F_{v1} = \frac{v}{t}, \text{ por lo tanto } v = F_v t = \left(14.28 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}\right) (151 \text{ s}) = 2156.28 \text{ cm}^3$$

$$Q_1 = mc\Delta T = (100 \text{ g}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right) (55^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 3000 \text{ cal}$$

$$\rho_e = \frac{Q}{v} = \frac{3000 \text{ cal}}{2.156 \text{ L}} = 1391.2849 \frac{\text{cal}}{\text{L}}$$

$$\rho = 0.00252 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \text{ por lo tanto } m = v\rho$$

$$m = (2156.28 \text{ cm}^3) \left(0.00252 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 5.43 \text{ g}$$

$$P = \frac{Q}{m} = \frac{3000 \text{ cal}}{5.43 \text{ g}} = 552.48 \text{ cal/g}$$

$$F_{v2} = \frac{v}{t}, \text{ por lo tanto } v = F_v t = \left(14.28 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}\right) (220 \text{ s}) = 3141.6 \text{ cm}^3$$



$$Q_2 = mc\Delta T = (100 \text{ g}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right) (55^\circ\text{C} - 11^\circ\text{C}) = 4400 \text{ cal}$$

$$\rho_e = \frac{Q}{v} = \frac{4400 \text{ cal}}{3.1416 \text{ L}} = 1400.5602 \frac{\text{cal}}{\text{L}}$$

$$\rho = 0.00252 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \text{ por lo tanto } m = v\rho$$

$$m = (3141.6 \text{ cm}^3) \left(0.00252 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 7.91 \text{ g}$$

$$P = \frac{Q}{m} = \frac{4400 \text{ cal}}{7.91 \text{ g}} = 556.25 \text{ cal/g}$$

$$F_{v3} = \frac{v}{t}, \text{ por lo tanto } v = F_v t = \left(14.28 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}\right) (177 \text{ s}) = 2527.56 \text{ cm}^3$$

$$Q_3 = mc\Delta T = (100 \text{ g}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right) (55^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 3500 \text{ cal}$$

$$\rho_e = \frac{Q}{v} = \frac{3500 \text{ cal}}{2.52 \text{ L}} = 1388.88 \frac{\text{cal}}{\text{L}}$$

$$\rho = 0.00252 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \text{ por lo tanto } m = v\rho$$

$$m = (2527.56 \text{ cm}^3) \left(0.00252 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 6.36 \text{ g}$$

$$P = \frac{Q}{m} = \frac{3500 \text{ cal}}{6.36 \text{ g}} = 550.31 \text{ cal/g}$$

Tabla 5. Poder calorífico del gas butano.

Intento	Poder calorífico (cal/g)	Densidad energética (cal/L)
1	552.48	1391.2849
2	556.25	1400.5602
3	550.31	1388.88

$$\text{Valor medio de la densidad energética } \frac{\text{cal}}{\text{L}} = \frac{1391.2849 + 1400.5602 + 1388.88}{3} = 1393.57 \text{ cal/L}$$

$$\text{Valor medio del poder calorífico en } \frac{\text{cal}}{\text{g}} = \frac{552.48 + 556.25 + 550.31}{3} = 553.0133 \text{ cal/g}$$

Costo por litro de Gas Butano=6.08 pesos



$$\text{Redimiento energético por costo} = \frac{1393.57 \text{ cal}}{6.08 \text{ pesos}} = 229.205 \text{ cal/peso}$$

Tabla 6. Producción de hidrógeno con respecto al tiempo.

Hidrógeno producido (cm ³)	Tiempo (h)
20	91
15	73
31	144

$$\text{Producción de Hidrógeno}_1 = \frac{v}{t} = \frac{20 \text{ cm}^3}{91 \text{ h}} = 0.2197 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}}$$

$$P_{H_2} = \frac{15 \text{ cm}^3}{72 \text{ h}} = 0.2054 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}}$$

$$P_{H_3} = \frac{31 \text{ cm}^3}{144 \text{ h}} = 0.2152 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Valor medio de producción de hidrógeno en } \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} = \frac{0.2197 + 0.2054 + 0.2152}{3} = 0.2134 \text{ cm}^3/\text{h}$$

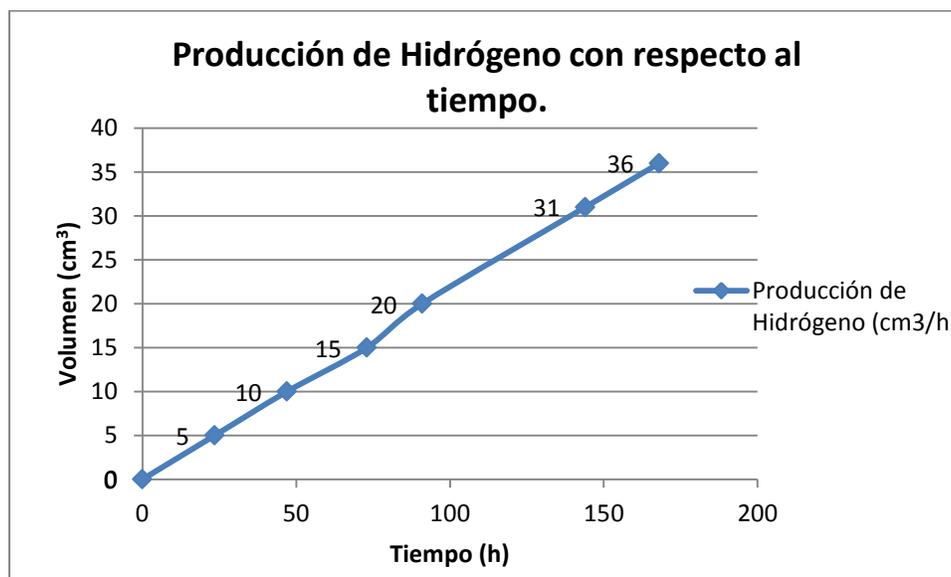


Tabla 7. Producción de hidrógeno con respecto a la concentración de la solución iónica.

Concentración (Kg/L)	Tiempo (h)	Volumen de hidrógeno
----------------------	------------	----------------------



		(cm ³)
0	48	3
0.1428	48	6
0.4285	48	10.24

$$\text{Producción de hidrógeno}_1 = \frac{v}{t} = \frac{3 \text{ cm}^3}{48 \text{ h}} = 0.0625 \text{ cm}^3/\text{h}$$

$$P_{H_2} = \frac{6}{48 \text{ h}} = 0.125 \text{ cm}^3/\text{h}$$

$$P_{H_3} = \frac{10.24 \text{ cm}^3}{48 \text{ h}} = 0.2134 \text{ cm}^3/\text{h}$$

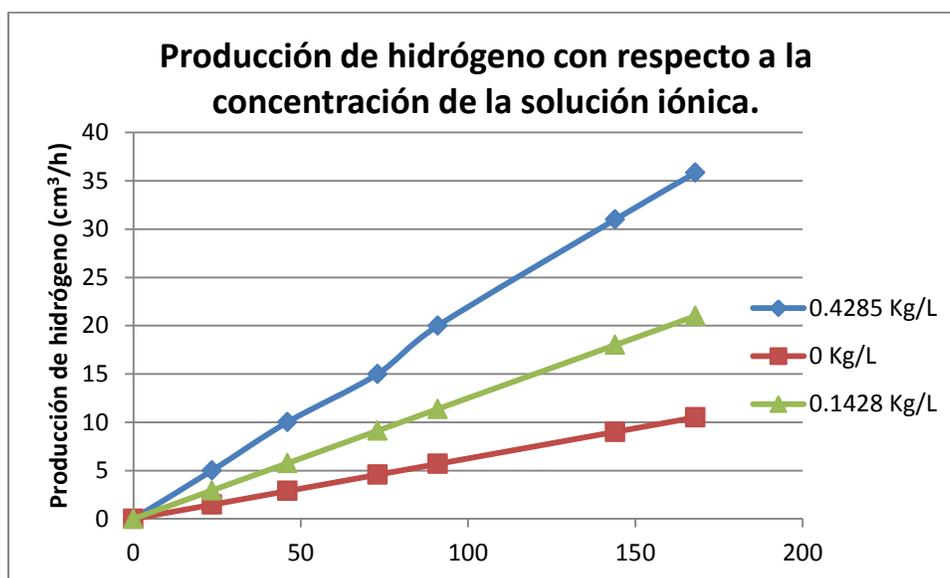


Tabla 8. Calor obtenido con la combustión del hidrógeno.



Hidrógeno utilizado (cm ³)	Masa del agua (g)	Temperatura inicial del agua (°C)	Temperatura final del agua (°C)	Calor específico del agua (cal/g°C)
20	100	16	16.9	1
15	100	18	18.6	1
31	100	16	17.3	1

$$Q_1 = mc\Delta T = (100 \text{ g}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right) (16.9^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C}) = 90 \text{ cal}$$

$$\rho_e = \frac{Q}{v} = \frac{90 \text{ cal}}{0.02 \text{ L}} = 4500 \frac{\text{cal}}{\text{L}}$$

$$\rho = 0.00084 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \text{ por lo tanto } m = v\rho$$

$$m = (20 \text{ cm}^3) \left(0.00084 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 0.0168 \text{ g}$$

$$P = \frac{Q}{m} = \frac{90 \text{ cal}}{0.0168 \text{ g}} = 5357.1428 \text{ cal/g}$$

$$Q_2 = mc\Delta T = (100 \text{ g}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right) (18.6^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C}) = 60 \text{ cal}$$

$$\rho_e = \frac{Q}{v} = \frac{60 \text{ cal}}{0.015 \text{ L}} = 4000 \frac{\text{cal}}{\text{L}}$$

$$\rho = 0.00252 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \text{ por lo tanto } m = v\rho$$

$$m = (15 \text{ cm}^3) \left(0.00084 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 0.0126 \text{ g}$$

$$P = \frac{Q}{m} = \frac{60 \text{ cal}}{0.0126 \text{ g}} = 4761.9047 \text{ cal/g}$$

$$Q_3 = mc\Delta T = (100 \text{ g}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right) (17.3^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C}) = 130 \text{ cal}$$

$$\rho_e = \frac{Q}{v} = \frac{130}{0.031 \text{ L}} = 4193.5488 \frac{\text{cal}}{\text{L}}$$

$$\rho = 0.00084 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \text{ por lo tanto } m = v\rho$$

$$m = (31 \text{ cm}^3) \left(0.00084 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 0.02604 \text{ g}$$



$$P = \frac{Q}{m} = \frac{130 \text{ cal}}{0.02604 \text{ g}} = 4992.3195 \text{ cal/g}$$

Tabla 8. Poder calorífico del hidrógeno.

Intento	Poder calorífico (cal/g)	Densidad energética (cal/L)
1	5357.1428	4500
2	4761.9047	4000
3	4992.3195	4193.5488

$$\text{Valor medio de la densidad energética } \frac{\text{cal}}{\text{L}} = \frac{4500 + 4000 + 4193.5488}{3} = 4231.1829 \text{ cal/L}$$

$$\text{Valor medio del poder calorífico en } \frac{\text{cal}}{\text{g}} = \frac{5357.1428 + 4761.9047 + 4992.3195}{3} = 5037.1223 \text{ cal/g}$$

Tabla 9. Producción con respecto a la cantidad de energía eléctrica utilizada.

Hidrógeno Producido (cm ³)	Tiempo (s)	Potencial eléctrico inicial (volts)	Potencial eléctrico final (volts)	Resistencia (Ω)
20	91	127	115	3
15	73	127	115	3
31	144	127	115	3

$$\text{Diferencia de potencial eléctrico } _1 = dep_i - dep_f = 127 \text{ volts} - 115 \text{ volts} = 12 \text{ volts}$$

$$\text{Potencia} = \frac{ddp^2}{R} = \frac{(12 \text{ volts})^2}{3 \Omega} = 48 \text{ watts}$$

$$\text{Flujo eléctrico} = 144 \frac{\text{volts}}{\text{min}} = 8640 \frac{\text{volts}}{\text{h}}$$

$$\text{Energía eléctrica} = Pt = (48 \text{ watts})(91(60\text{min})) = 262.08 \text{ Kilowatts hora}$$

$$\text{Producción de hidrógeno en relación a la energía eléctrica} = \frac{v}{E_e} = \frac{20 \text{ cm}^3}{262.08 \text{ Kwh}} = 0.0763 \text{ cm}^3/\text{Kwh}$$



$$\text{Diferencia de potencial eléctrico}_2 = dep_i - dep_f = 127 \text{ volts} - 115 \text{ volts} = 12 \text{ volts}$$

$$\text{Potencia} = \frac{ddp^2}{R} = \frac{(12 \text{ volts})^2}{3 \Omega} = 48 \text{ watts}$$

$$\text{Flujo eléctrico} = 144 \frac{\text{volts}}{\text{min}} = 8640 \frac{\text{volts}}{\text{h}}$$

$$\text{Energía eléctrica} = Pt = (48 \text{ watts})(73(60\text{min})) = 210.24 \text{ Kilowatts hora}$$

$$\text{Producción de hidrógeno en relación a la energía eléctrica} = \frac{v}{E_e} = \frac{15 \text{ cm}^3}{210.24 \text{ Kwh}} = 0.0713 \text{ cm}^3/\text{Kwh}$$

$$\text{Diferencia de potencial eléctrico}_3 = dep_i - dep_f = 127 \text{ volts} - 115 \text{ volts} = 12 \text{ volts}$$

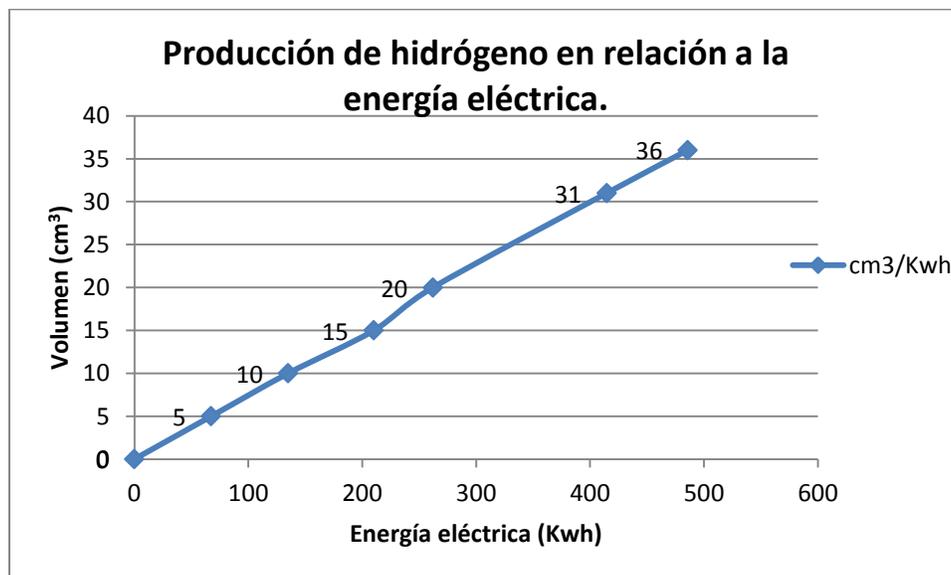
$$\text{Potencia} = \frac{ddp^2}{R} = \frac{(12 \text{ volts})^2}{3 \Omega} = 48 \text{ watts}$$

$$\text{Flujo eléctrico} = 144 \frac{\text{volts}}{\text{min}} = 8640 \frac{\text{volts}}{\text{h}}$$

$$\text{Energía eléctrica} = Pt = (48 \text{ watts})(144(60\text{min})) = 414.72 \text{ Kilowatts hora}$$

$$\text{Producción de hidrógeno en relación a la energía eléctrica} = \frac{v}{E_e} = \frac{31 \text{ cm}^3}{414.72 \text{ Kwh}} = 0.0747 \text{ cm}^3/\text{Kwh}$$

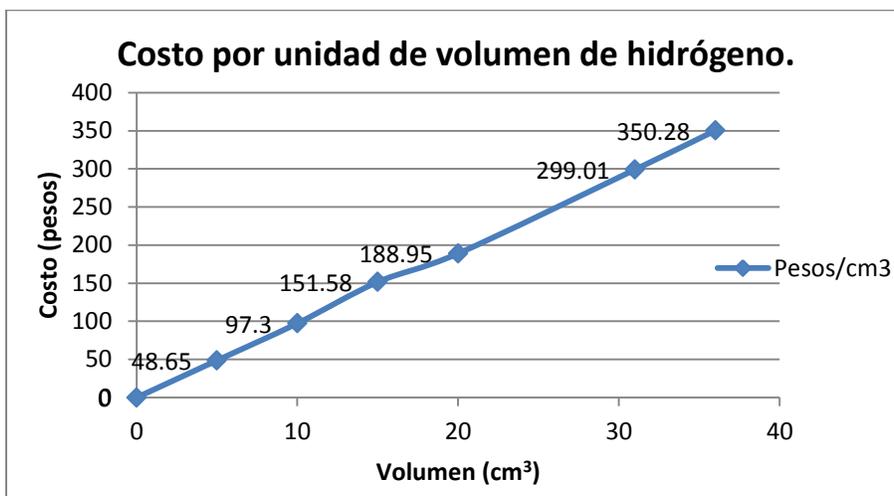
$$\text{Valor medio de producción de hidrógeno en} \frac{\text{cm}^3}{\text{Kwh}} = \frac{0.0713 + 0.0747 + 0.0763}{3} = 0.0741 \text{ cm}^3/\text{Kwh}$$



Costo del Kwh= 0.721 pesos.



$$\text{Costo de la unidad de volumen de hidrógeno} = \frac{0.721(\sum E_e)}{\sum v} = \frac{0.721(414.72 + 210.24 + 262.08)}{31 + 15 + 20} = 9.69 \text{ pesos/cm}^3$$



$$\text{Rendimiento energético por costo} = \frac{4231.1829 \text{ cal}}{9690 \text{ pesos}} = 0.4366 \frac{\text{cal}}{\text{peso}}$$

Tabla 10. Poder calorífico de los combustibles.

Combustible	Poder calorífico (cal/g)	Densidad energética (cal/L)
Gasolina	646.0983	403813.184
Butano	553.0133	1393.57
Hidrógeno	5037.1223	4231.1829



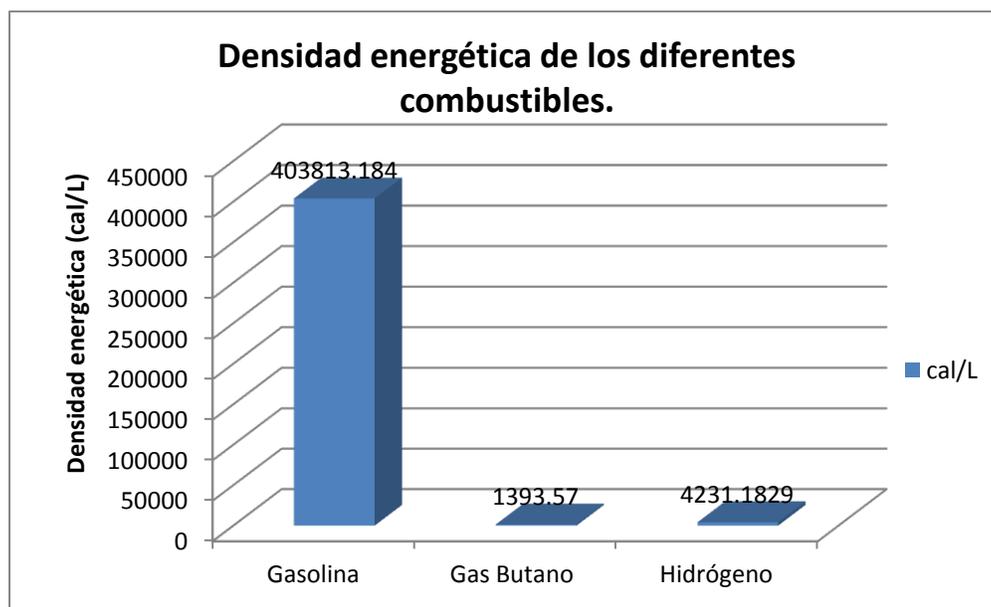
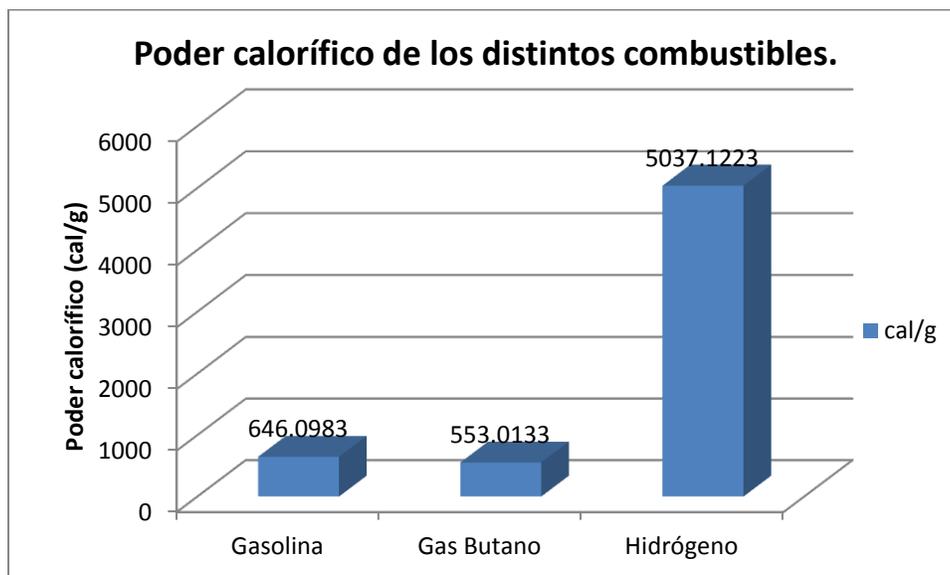


Tabla 11. Rendimiento energético por costo de los combustibles.

Combustible	Rendimiento energético (cal/pesos)
Gasolina	35799.04
Butano	229.205
Hidrógeno	0.4366

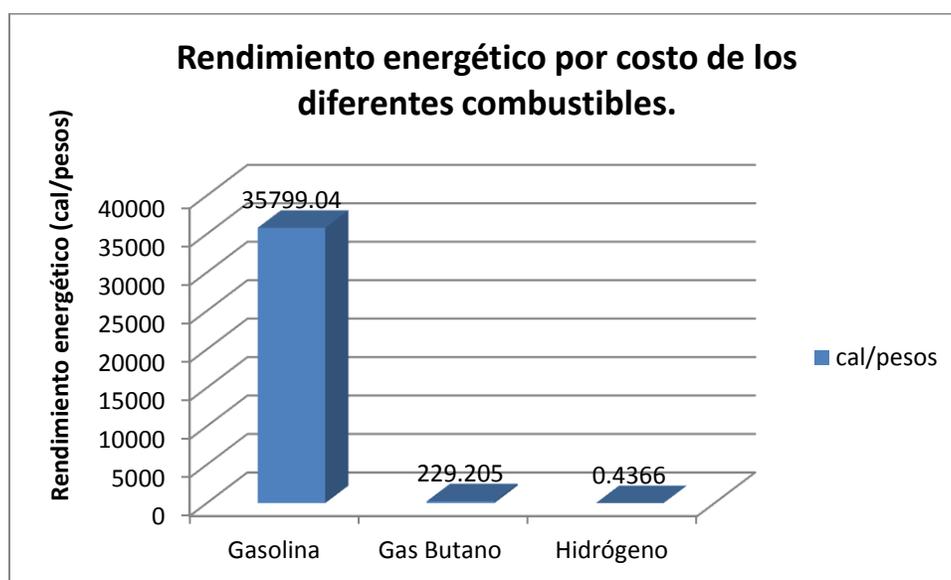


Foto 1. Celda en funcionamiento





Foto 2. Circuito completo.

