

**CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN  
ELECTROLIZADOR DE HIDRÓGENO EN ESPIRAL PARA  
DISMINUIR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN  
AUTOMÓVILES**



**JUAN CARLOS OROZCO AGAMEZ  
ALFONSO SALAMANCA ECHEVERRI**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA QUÍMICA  
CARTAGENA DE INDIAS, D. T. Y C.**

**2012**

**CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN  
ELECTROLIZADOR DE HIDRÓGENO EN ESPIRAL PARA  
DISMINUIR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN  
AUTOMÓVILES**



**JUAN CARLOS OROZCO AGAMEZ  
ALFONSO SALAMANCA ECHEVERRI**

**TRABAJO DE GRADO REALIZADO PARA OPTAR EL TITULO COMO  
INGENIERO QUÍMICO**

**ÁLVARO REALPE JIMÉNEZ, Ph.D.  
Director de Tesis**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA QUÍMICA  
CARTAGENA DE INDIAS, D. T. Y C.**

**2012**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Cartagena D.T y C. Agosto 9 de 2012.**

## DEDICATORIA

En primer lugar a Dios por darme la sabiduría, fuerza y el amor necesario para no desfallecer en cada reto, a mis padres Juan Carlos Orozco Rivera y Yolanda Agamez Rodríguez, quienes gracias a su amor y ánimo me permitieron crecer como persona, igualmente a mis hermanos y familiares cercanos, los cuales se convirtieron en una fuente de confianza y apoyo, a amigos y compañeros de clases, por la ayuda y amistad brindada para hacer posible el cumplimiento de este sueño, a nuestro director, el cual nos brindó sus conocimientos y entera colaboración para la elaboración total de nuestro proyecto, a todo el cuerpo docente, que aportaron una amplia gama de conocimientos para mi formación y finalmente, a todo el cuerpo administrativo de la universidad, que tanto me acogió en este camino que conlleva ser profesional.

***Juan Carlos Orozco Agamez***

## DEDICATORIA

Ante todo a ese ser supremo que me permitió estar con todas las personas que quiero y que me apoyaron en todo momento, Dios. Gracias a el por darme toda la sabiduría y fortaleza en los momentos más necesitados y el que nunca me dejó desfallecer, a mis padres Alfonso Salamanca Galvis y Helda Rosa Echeverri Bolívar, por darme todo su apoyo incondicional y sus valiosos consejos de seguir adelante y no rendirse en el camino, a mis hermanos por brindarme una voz de aliento y las fuerzas de compromiso y humildad ante los retos, a mis amigos y compañeros de clases que se convirtieron en personas especiales y que gracias a ellos me encuentro en donde estoy, y a todo el personal de la universidad de Cartagena entre docentes y personal administrativo por servirnos de guía y brindarnos todos sus conocimientos que me hacen crecer hoy profesionalmente.

***Alfonso Salamanca Echeverri***

## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar el más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su gran ayuda han aportado en la realización de este trabajo.

Expreso sincera gratitud a todo el cuerpo docente, el cual siempre me brindo el apoyo académico y ético para mi formación, en especial al Dr. Álvaro Realpe, director de esta investigación, por la orientación, seguimiento y motivación para el cumplimiento de la misma, a las Ingenieras Candelaria Tejada, Lesly Tejada y Gesira De Avila, por su colaboración en la realización de este trabajo, igualmente agradezco a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena por su apoyo y constante motivación, además, quisiera extender agradecimientos a mis compañeros de clases que siempre me brindaron su apoyo incondicional.

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de nuestras familias y amigos.

A todos ellos, Muchas gracias.

***Juan Carlos Orozco Agamez***

## AGRADECIMIENTOS

Un grato y especial agradecimiento a todas estas personas que me apoyaron directa o indirectamente en la elaboración de este proyecto y en el logro personal de crecer personalmente:

A mi padre que me colaboro siempre con el material intelectual e instrumental, a Raul Vergara por su ayuda incondicional en la construcción del dispositivo electrolítico, al cuerpo de docentes en general de la carrera que me brindo siempre el conocimiento y la orientación a la hora de realizar la investigación, al Dr. Álvaro Realpe, director de este proyecto investigativo, por orientarnos y motivarnos siempre a cumplir a cabalidad con lo propuesto, a mis amigos y compañeros de clases que gracias a ellos les debo gran parte de este logro a alcanzar y a todas esas personas que no aportaron conocimiento pero si ánimo para que nunca decayera en el camino.

Mis más sinceros agradecimientos para todos y cada uno de ellos.

***Alfonso Salamanca Echeverri***

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	19
2. JUSTIFICACIÓN .....	20
3. OBJETIVOS .....	21
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS .....	21
4. MARCO REFERENCIAL.....	22
4.1 ANTECEDENTES .....	22
4.2 ESTADO DEL ARTE .....	24
4.3 MARCO TEÓRICO.....	26
4.3.1 INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA .....	26
4.3.2 PLANTEAMIENTO TERMODINAMICO .....	26
4.3.3 PLANTEAMIENTO ELÉCTRICO.....	30
4.3.4 CALCULOS DE CAUDALES DE PROCESO.....	32
5. METODOLOGÍA .....	34
5.1 DISEÑO DEL DISPOSITIVO.....	34
5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL .....	35
5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	35
5.4 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS .....	38
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	39
6.1 DISEÑO DEL ELECTROLIZADOR .....	39
6.2 CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROLIZADOR .....	42
6.2.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS ELECTRODOS Y SU BASE.....	43
6.2.2 CONSTRUCCIÓN DEL CONTENEDOR DE LOS ELECTRODOS.....	45



6.3	EVALUACIÓN DEL AMPERAJE CONTRA CAUDAL DE HIDRÓGENO .....	46
6.4	EVALUACIÓN DEL AHORRO DE COMBUSTIBLE FOSIL, POR MEDIO DEL CONSUMO DEL AUTO UNA VEZ INSTALADO EL SISTEMA ELECTROLIZADOR, PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE ESTE.....	51
6.4.1	REVISIÓN DEL AUTOMOVIL.....	51
6.4.2	INSTALACIÓN DEL SISTEMA ELECTROLIZADOR EN EL AUTOMOVIL.....	51
6.4.3	RECOLECCIÓN DE DATOS .....	52
6.4.4	DETERMINACIÓN DEL COMBUSTIBLE CONSUMIDO .....	55
6.5	DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE CO <sub>2</sub> QUE SE DEJARIA DE EMITIR, A TRAVES DE METODOS ESTEQUIOMETRICOS, PARA REALIZAR COMPARACIONES SIN EL USO DEL ELECTROLIZADOR .....	57
7.	CONCLUSIONES .....	59
8.	RECOMENDACIONES .....	61
	REFERENCIAS .....	62

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. VALORES DE ENTALPIA DE REACCIÓN.....	28
TABLA 2. VALORES DE COEFICIENTES DE ENTALPIA Y ENTROPÍA.....	29
TABLA 3. DATOS OBTENIDOS SIN EL USO DEL ELECTROLIZADOR .....	52
TABLA 3. DATOS OBTENIDOS SIN EL USO DEL ELECTROLIZADOR (CONTINUACIÓN) .	53
TABLA 4. DATOS OBTENIDOS CON EL USO DEL ELECTROLIZADOR.....	54

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. ESPACIO INTERNO PARA LA UBICACIÓN DEL DISPOSITIVO. ....	36
FIGURA 2. SISTEMA ELECTROLIZADOR INSTALADO EN EL CARRO.....	37
FIGURA 3. SISTEMA DE ENCENDIDO MANUAL Y FUSIBLE. ....	37
FIGURA 4. RODILLO UTILIZADO PARA CONSTRUIR LOS ELECTRODOS EN ESPIRAL.....	42
FIGURA 5. CONSTRUCCIÓN DE LOS ELECTRODOS. ....	43
FIGURA 6. ELECTRODOS EN ESPIRAL.....	44
FIGURA 7. VISTA INTERNA DE LOS ELECTRODOS TERMINADOS. ....	45
FIGURA 8. VISTA FRONTAL DE LOS ELECTRODOS TERMINADOS. ....	45
FIGURA 9. VISTA FRONTAL DEL ELECTROLIZADOR.....	46
FIGURA 10. GRÁFICA CAUDAL VS AMPERAJE.....	48
FIGURA 11. GRAFICA VOLTAJE VS AMPERAJE.....	49

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: EQUIPO PARA LA FABRICACIÓN DE LOS ELECTRODOS.....	65
ANEXO B: BURBUJEADOR .....	67
ANEXO C: CONDICIONES EXPERIMENTALES.....	69
ANEXO D: EVALUACIÓN ECONOMICA.....	70
ANEXO E: DATOS AUTOMOVIL USADO .....	71
ANEXO F: DATOS FUENTE REGULADORA .....	72
ANEXO G: MANUAL DE SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO DEL ELECTROLIZADOR .....	73
ANEXO H: PLANOS DE LA BASE Y DEL ELECTROLIZADOR .....	76

## RESUMEN

A la luz de la creciente problemática por las altas emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), se planteó hacer uso del hidrógeno como combustible alternativo para reducir el consumo de gasolina en automóviles, esto con el objetivo de buscar una manera de disminuir los altos índices de contaminación hacia la atmósfera.

En esta investigación se propuso el diseño, construcción y evaluación de un electrolizador en espiral para la producción de hidrógeno en automóviles y consecuente disminución de combustibles fósil a suministrar al vehículo (gasolina), esta disminución del combustible fósil disminuiría no solo los costos en cuestión a gasolina si no también una disminución de los gases de efecto invernaderos suministrados a la atmósfera.

Para la realización del trabajo se diseñó y construyó un electrolizador en espiral y se adquirió una fuente reguladora de voltaje-amperaje para realizar las pruebas a escala laboratorio. El comportamiento observado al variar los parámetros con respecto al caudal de hidrógeno se asimiló a una recta con pendiente positiva, además, se determinó la producción a las condiciones de voltaje y amperaje de un automóvil (12 voltios y 24 amperios), para estos valores y con los resultados obtenidos a escala laboratorio se encontró que el caudal de producción sería de  $0,0009282 \text{ mol H}_2/\text{s}$ . Posteriormente se instaló el sistema completo en el automóvil, este contó con un electrolizador en espiral, necesario para la producción del gas combustible y un burbujeador, el cual se utilizó como filtro para la posterior entrada de los gases a la cámara de combustión. La energía necesaria para la reacción fue suministrada por el sistema interno del auto, específicamente la batería de este.

Los resultados indican una reducción en el consumo de gasolina en un porcentaje del 23%; Además, por métodos estequiométricos, se determinó la cantidad de partículas contaminantes ( $\text{CO}_2$ ), que se dejaron de emitir a la atmosfera, la cual fue 1819,84 g a una distancia recorrida de aproximadamente 32 km.

Por medio del estudio realizado, podemos resaltar que el uso de este combustible traería consigo grandes implicaciones al esfuerzo por disminuir las emisiones de gases contaminantes, problemática de gran interés en nuestra sociedad actual.

Palabras claves: Electrolizador, electrólisis, hidrógeno, contaminación atmosférica, disminución de combustible.

## ABSTRACT

In light of the growing problem by the emission of gases that contribute to greenhouse gases, mainly carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) was wont to make use of hydrogen as an alternative fuel to reduce fuel consumption in vehicles, this in order of, find a way to reduce the high levels of pollution into the atmosphere.

This research proposed the design, construction and evaluation of a spiral electrolyzer to produce hydrogen in cars and consequent reduction of fossil fuels to supply the vehicle (gasoline), this decrease would reduce fossil fuel costs not only concerned to gasoline but also a decrease of greenhouse effect gases supplied to the atmosphere.

To carry out the work we built a spiral electrolyzer based on a previous design, it became a source of voltage regulator for laboratory scale tests, which would increase the voltage from 0 to 14 volts while the amperage with this, we obtained results on the flow behavior by varying these parameters and determine the production to the conditions of voltage and amperage of a car are in denominations of 12 volts and 24 amps, for these values and the results obtained laboratory scale was found that the production rate would be of  $0.0009282 \text{ mol H}_2 / \text{s}$ . Then the whole system was installed in the car, this system had a spiral electrolyzer which conducted the electrolysis process, necessary for the production of fuel gas and a bubbler, which was used as a filter for the subsequent entry of gases to the combustion chamber. The energy required for the reaction was provided by the internal system of the car, specifically the battery in this.

The results indicate a reduction in gasoline consumption at a rate of 23%. In addition, stoichiometric methods, we determined the amount of particulate pollutants (CO<sub>2</sub>), which were allowed to emit into the atmosphere, which was 1819.84 g a distance of about 32 km.

Through study, we note that the use of this fuel would bring great implications in the effort to reduce greenhouse gas emissions, issue of great interest in our society.

Keywords: Electrolyzer, electrolysis, hydrogen, air pollution, reduced fuel.



## INTRODUCCIÓN

Actualmente el uso de los combustibles fósiles ha originado serios problemas a nuestro ecosistema, esto debido al gran aumento de emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, descongelamiento de los polos y aumento del nivel del mar, por estas razones es necesario buscar de forma rápida, alternativas que ayuden a disminuir todos estos eventos, y que el grado de contaminación sea menor.

El aumento de la demanda del petróleo ha hecho que las reservas de esta materia prima disminuyan, aumentando los costos cada vez más de la gasolina utilizada en automóviles (Kelly y Otros, 2010). Una forma de disminuir el consumo de gasolina en los automóviles es mediante la implementación de un electrolizador que produzca hidrógeno a partir del agua. El hidrógeno es un combustible que es alimentado al motor de combustión de forma similar como se hace actualmente con el gas natural. La energía eléctrica necesaria para la electrólisis es suministrada por el mismo automóvil a través del alternador, el cual convierte la energía mecánica en eléctrica. (Martínez y Otros, 2003).

Se han realizado investigaciones para la optimización del proceso de electrolisis, básicamente por medio de la adición de catalizadores como platino y cobre (Tanaka y Otros, 2002). El uso de este combustible por medio del proceso de electrolisis, se ha implementado principalmente en el continente asiático, donde se han obtenido resultados satisfactorios.

El objetivo de este trabajo es construir un electrolizador para suministrar hidrógeno al motor de combustión de un carro, con el fin de ahorrar combustible fósil, teniendo en cuenta los principios termodinámicos y electroquímicos. Inicialmente, se seleccionará el material, dimensión y forma de los electrodos de acuerdo a la

producción de hidrógeno requerido por el vehículo, después se procederá a realizar pruebas al dispositivo en los laboratorios de la Universidad de Cartagena, se instalará el sistema electrolizador en el auto, y finalmente se evaluará la disminución del combustible en la vía que comunica Cartagena-Bayunca (La cordialidad), estableciendo un recorrido de 32 km con y sin el dispositivo.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El clima del planeta ha estado en constante evolución desde su punto de origen, pero en los últimos tiempos se han presenciado drásticos cambios, causados principalmente por el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, las cuales crean una capa muy densa en la atmósfera que impide que los rayos del sol refractados por la tierra no logren salir de forma natural, ocasionando con esto que la superficie terrestre cada vez más aumente su temperatura (Ding, 2011).

El elevado crecimiento poblacional mundial y el desproporcionado consumo energético que trae consigo esto, obliga a la sociedad a encontrar mejores fuentes de energía sostenibles (Sabine y Otros, 2010), que reemplacen a los combustibles convencionales, es así como surge la necesidad de utilizar fuentes alternativas de energía renovable.

Aproximadamente el 18% de las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de la combustión de combustibles fósiles presentada en los automóviles (Veziroglu y Otros, 1989). Según datos revelados por Ecopetrol en el 2011, el consumo de gasolina en el país tuvo un aumento del 13,6% con respecto al año anterior, esto sumado con el incremento de su precio el cual se registró en enero del 2012 alrededor de los 8,509.04 pesos por galón, han convertido insostenibles a estos combustibles, incentivando así una búsqueda incesante de nuevas tecnologías para reducir su consumo en los automóviles (Sabine y Otros, 2010), es así, como el hidrógeno se convierte en una opción para el futuro con el fin de sustituir al petróleo como fuente primaria de energía, ya que este es el elemento más abundante del universo, es limpio y a largo plazo los riesgos de contaminación son casi inexistentes, debido a que la energía del hidrógeno se da sin radioactividad, y su contribución al efecto invernadero es muy pequeño, aunque cabe destacar, que las técnicas de almacenamiento son un poco costosas y pueden llegar a presentar ciertos riesgos, además la producción de este suele presentar niveles de pureza no aptos para el uso (Winter, 2009).

## 2. JUSTIFICACIÓN

El propósito de nuestro proyecto es mitigar un poco el uso descontrolado de los combustibles procedentes de los fósiles disminuyendo así las emisiones contaminantes a la atmosfera y creando nuevas tecnologías a la ciudad dándole un desarrollo en cuanto al ambiente se trata.

El ciclo del Hidrógeno no contamina de ninguna manera, es absolutamente amigable y armonioso con la naturaleza humana y con la vida en todas sus formas (Winter, 2009). Así, la obtención de hidrógeno se convierte en una vía que contribuye directamente a la reducción de gases de efecto invernadero que ayudaría a enfrentar el cambio climático (Kriston y Otros, 2010).

La obtención de hidrógeno para este proyecto se llevará a cabo por medio del diseño, construcción, montaje y puesta en marcha de un electrolizador en un auto, el cual se hará en base a parámetros, análisis termodinámicos y electroquímicos, en donde se efectuará la mezcla del hidrógeno con la gasolina internamente en el motor (Sivasubramanian y Otros, 2007), esto con el fin de aumentar la cantidad de combustible total y por consiguiente ahorrar potencialmente la gasolina que se utiliza, proporcionando así más economía y un ambiente más descontaminado.

El uso masivo de electrolizadores disminuirá el consumo de gasolina y ayudará a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, lo cual se convierte en una de las preguntas más importantes que se pretende responder a largo plazo con este proyecto.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

- ✓ Diseñar, Construir y evaluar un electrolizador basado en la termodinámica y la ley de Faraday, para instalarlo en automóviles con el fin de disminuir el consumo de los combustibles fósiles.

#### **3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS**

- ✓ Diseñar un electrolizador basado en la termodinámica y la ley de Faraday, para la producción de hidrógeno.
- ✓ Construir un electrolizador con base al diseño realizado y a los parámetros establecidos, con el propósito de instalarlo en los automóviles.
- ✓ Evaluar el efecto del amperaje, por medio de una fuente reguladora para determinar la producción de hidrógeno.
- ✓ Establecer y evaluar el ahorro de combustible fósil en el auto debido al uso del electrolizador.
- ✓ Determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> que dejaría el auto de emitir en comparación con otros combustibles fósiles.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1 ANTECEDENTES

Debido al incremento desproporcionado de automotores en las ciudades es necesario buscar fuentes de energía alternativas, que no se basen solo en combustibles provenientes de restos fósiles si no a través de otras alternativas que sean menos contaminantes al ambiente y de fácil acceso, para un caso en particular encontramos la producción de hidrógeno a través de un proceso electrolítico que se basa en la descomposición del agua en sus moléculas elementales hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ).

La electrólisis como proceso básico no es completamente óptimo, estudios anteriores han buscado la forma de optimizar el proceso de electrolisis, una solución que se ha planteado es el uso de catalizadores, con el objetivo de aumentar la velocidad de reacción de descomposición que se tiene en los electrodos. La función de las celdas de combustible en gran parte depende de electrodos catalíticos que llevan a cabo una reacción química para convertir el combustible en energía eléctrica. Para ello, según un estudio llevado a cabo con diferentes catalizadores preparado a partir de varios precursores y probados en las celdas de combustible para la generación de energía en condiciones idénticas tales catalizadores como platino y cobre (Tanaka y Otros, 2002).

Otra variable o efectos a investigar son los diferentes combustibles que se emplean actualmente en los automóviles (gasolina, metanol, etanol, dimetil éter, metano), con respecto a la producción de hidrógeno para los sistemas del automóvil tales variables son octanaje de cada uno de los combustibles, corrosión en el motor todo esto en condiciones idénticas (Semelsbergery Borup, 2004).

También se ha tratado sobre el intercambio de protones de combustible a través de membrana celular (PEMFC) y comparadas con respecto a la energía que liberan. El modelado de estas celdas de combustible son mucho más rígidas que la electrólisis; en cuanto a la optimización es mucho más factible el manejo de la celda electrolítica (Biyiko~Glu, 2005).

Se están implementando como otra alternativa de optimización de las celdas electrolíticas, estrategias que se basen en la regulación de la tensión del circuito intermedio, y de la celda de combustible es simplemente para que operen en condiciones de estado casi constante con el fin de reducir al mínimo los esfuerzos mecánicos de las celdas de combustible (Thounthongy Otros, 2005).

Los olores en estas celdas también se han propuesto como un medio confiable y económico para permitir la detección de fugas para sistemas de hidrógeno y aumentar la seguridad pública. Aunque algunos Odorantes actual y potencial de olores tienen un impacto negativo en el rendimiento de células de combustible (Kopasz, 2006).

Este es un sistema de energía avanzada para el futuro que es sostenible, y limpio para el medio ambiente y además tiene en cuenta, el derecho internacional sobre el inminente control de gases de efecto invernadero y la energía renovable nacionales (Kamaruzzaman y WanDaud, 2005).

Se está estudiando también un método sistemático para obtener las condiciones óptimas de operación de un sistema de pila de combustible. Este método se basa en el acoplamiento de una pila semi-empírica de célula de combustible del modelo y un balance asociado de la planta (BOP) del modelo con un algoritmo de optimización con el fin de explorar de forma eficiente y el rango de condiciones de operación posibles (Wishart y Otros, 2006).

## 4.2 ESTADO DEL ARTE

Para nadie es un misterio que en los últimos años, uno de los temas en el cual se ha determinado un mayor esfuerzo investigativo es al de los combustibles renovables. Entre estos ocupa un lugar muy importante el hidrogeno (Andrews y Shabani, 2011). El uso de este como portador de energía es una opción a favor del potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> básicamente liberadas por los vehículos (Verhelst y Otros 2009).

Uno de los limitantes del uso del hidrogeno se presenta en la relación entre los requisitos de pureza de hidrógeno para su uso en pilas de combustible y las capacidades de producción. Las impurezas pueden afectar negativamente el rendimiento de pila de combustible y durabilidad, y la composición del combustible. Como ya ha sido mencionado nuestro objetivo es producir hidrogeno por medio de una Celda electrolítica, tres tecnologías se pueden distinguir de acuerdo con el electrolito utilizado en la celda de electrólisis: la electrólisis alcalina con un electrolito líquido, otra tecnología es una membrana de electrolito de polímero (PEM) de electrólisis con un ionómero de ácidos y ultimo la de alta temperatura (HT) la cual es la electrólisis de vapor con un óxido sólido como el electrolito. Sin duda el uso del hidrogeno como fuente de energía constituye un sistema de cambio (Winter, 2009).

Uno de los puntos importantes para la implementación de este combustible es su almacenamiento, actualmente el método más usado es el de hidrógeno a alta presión (Zheng y Otros, 2011), aunque también son estudiados métodos con el uso de materiales nanoestructurados de carbono en absorción química (Yuda y Otros, 2009).

Aunque para nuestro trabajo se utilizará un medio de producción de hidrógeno a través de celdas electrolíticas uno de los temas principales que se están



estudiando actualmente es la producción del combustible a partir de la descomposición del metano (Hazzim y WanDaud, 2010), y de la descarbonización de combustibles fósiles (Cormos, 2011).

Cabe destacar que recientemente se llevó a cabo una investigación en china, la cual mostro claramente la necesidad de la implementación de hidrogeno en los motores de los automóviles para el desarrollo de la industria de estos vehículos (Zuo-yu y Otros, 2011). Estudios recientes afirman que las mezclas de gasolina con hidrogeno aumentan la eficiencia térmica de los motores y ayuda a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Shoufeng y Otros, 2011).

La eficiencia es un parámetro muy importante, por esto se han realizado diversos estudios teniendo como base la termodinámica del proceso de la electrolisis, sin embargo para este proceso hay varias expresiones de la eficiencia, por lo tanto el interés de cómo evaluar correctamente y calcular la eficiencia de producción de hidrogeno a partir de este proceso es un tema muy útil para ser discutido (Zhang y Otros, 2010).

A pesar de que el proceso de la electrólisis del agua para la producción de hidrógeno no es un tema reciente, su aplicación para la el campo de la obtención del combustible no ha sido tan amplia por esto actualmente se está investigando métodos para aumentar la eficacia de los dispositivos (celdas de combustibles). Teniendo en cuenta la información anterior el estudio de este tema ha cobrado gran importancia en los últimos dos años debido principalmente a las grandes emisiones de gases contaminantes que los combustibles fósiles liberan a la atmosfera.

## 4.3 MARCO TEÓRICO

### 4.3.1 INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA

La electrólisis del agua es una tecnología conocida, en la que se lleva investigando muchos años. De forma teórica se puede afirmar que la electrólisis del agua se produce cuando se hace pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en un electrolito ocasionando la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno. Este proceso está gobernado por la cinética de la reacción de descomposición y esta cinética a su vez está influenciada por la corriente y el voltaje empleado en la celda, trabajos anteriores han planteado modelos para encontrar la relación voltaje-corriente (Griesshaber y Sick, 1991), todos estos modelos tienen en cuenta una serie de irreversibilidades que se presentan en el proceso como sobre voltajes.

### 4.3.2 PLANTEAMIENTO TERMODINAMICO

La termodinámica nos dice que el trabajo distinto del trabajo de expansión mínimo ( $W_{REV}$ ) que es necesario aportar para que se ocurra un proceso no espontáneo a temperatura y presión constante es igual al incremento de energía libre de Gibbs de ese proceso ( $\Delta G_T$ ):

$$W_{REV} = \Delta G_T \quad (1)$$

Como el electrolizador solo tiene capacidad de intercambiar trabajo (distinto del trabajo de expansión) en forma de energía eléctrica en nuestro caso se cumple:

$$W_{ELE} = \Delta G_R \quad (2)$$

Donde  $\Delta G_R$  es el incremento de energía libre de Gibbs de reacción de la electrólisis del agua. Por otro lado la ley de Faraday relaciona este trabajo eléctrico y la velocidad de conversión en términos de cantidades molares. La expresión de la ley de Faraday es:

$$W_{ELE} = n * F * U \quad (3)$$

Donde  $n$  es el número de electrones transferidos en la electrólisis del agua (en este caso 2),  $U$  es voltaje aplicado en bornes de la celda electrolítica y  $F$  es la constante de Faraday de valor:

$$F = 96485.3383 \frac{C}{mol}$$

Finalmente combinado las expresiones anteriores y teniendo en cuenta que se ha supuesto un proceso reversible obtenemos la relación:

$$U_{rev} = \frac{\Delta G_r}{2 * F} \quad (4)$$

Donde  $U_{rev}$  es el voltaje reversible y se define como el voltaje mínimo necesario para que se produzca el proceso de electrolisis, es decir, el que se necesitaría si el proceso de electrolisis se realizara de forma ideal.

Si el proceso no se realiza de forma reversible el trabajo eléctrico necesario para la electrolisis será ahora:

$$W_{ELE} = \Delta H_R \quad (5)$$

Donde  $\Delta H_R$  es el incremento de entalpía de reacción de la electrólisis del agua.

Combinándolo con la ley de Faraday obtenemos:

$$U_{tn} = \frac{\Delta H_r}{2 * F} \quad (6)$$

Donde  $U_{tn}$  es el voltaje termonéutro que es el voltaje mínimo que asegura que se produzca la electrólisis del agua.

Nótese que  $U_{tn} \geq U_{rev}$  ya que:

$$\Delta H_R = \Delta G_R + T\Delta S_R \quad (7)$$

Donde  $\Delta S_R$  es el incremento de entropía de reacción de la electrólisis del agua.

Para calcular la energía de Gibbs de reacción se necesita tener el valor de la entalpia y entropía de formación de cada uno de los compuestos que intervienen en la reacción a una temperatura y presión de referencia ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $P=1\text{bar}$ ) para el agua, el hidrogeno y el oxígeno se reportan los siguientes valores:

Tabla 1. Valores de entalpia de reacción.

valores de las entalpias de formación		
Molécula	$\Delta H^\circ$ (j/mol)	$\Delta s^\circ$ (j/mol K)
Agua	-285800	69,9
Hidrogeno	0	130,6
Oxigeno	0	205

Fuente: Marangio, 2008

Ahora para calcular la entalpia de reacción a una temperatura distinta de la de referencia se utilizan las siguientes ecuaciones (Marangio, 2008):

$$H(T) = a_j T + \frac{4}{5} b_j T^{5/4} + \frac{2}{3} c_j T^{3/2} + \frac{4}{7} d_j T^{7/4} \quad (8)$$

$$S(T, P) = a_j \ln T + 4b_j T^{1/4} + 2c_j T^{1/2} + \frac{4}{3} d_j T^{3/4} - R \ln P \quad (9)$$

Donde los valores de las constantes se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de coeficientes de entalpia y entropía

Valores De Los Coeficientes				
Molécula	Aj	bj	cj	Dj
Agua	180	-85,4	15,6	-0,858
Hidrogeno	79,5	-26,3	4,23	-0,197
Oxigeno	10,3	5,4	-0,18	0

Fuente: Marangio, 2008

Ya con los valores de la entalpia y de la entropía Procedemos a calcular el cambio de la temperatura de referencia a la temperatura de trabajo de la celda para cada molécula en la reacción.

$$\Delta H_j = H_j(T) - H_j(T_{ref}) \quad (10)$$

$$\Delta S_j = S_j(T) - S_j(T_{ref}) \quad (11)$$

Seguido a esto se calculan la entalpia y entropía de reacción a la temperatura y presión de trabajo

$$\Delta H_R = \Delta H_{productos} - \Delta H_{reactivos} = \Delta H_{H_2} + \frac{1}{2} \Delta H_{O_2} - \Delta H_{H_2O} \quad (12)$$

$$\Delta S_R = \Delta S_{productos} - \Delta S_{reactivos} = \Delta S_{H_2} + \frac{1}{2} \Delta S_{O_2} - \Delta S_{H_2O} \quad (13)$$

Y ya estaríamos en condiciones de poder calcular el voltaje reversible y el voltaje termonéutro.

### 4.3.3 PLANTEAMIENTO ELÉCTRICO

Antes de mostrar el modelo eléctrico es preciso definir las posibles irreversibilidades que se presentan en el proceso de electrolisis, estas irreversibilidades que afectan la celda con un aumento en el potencia aplicado, también son conocidas como sobrevoltajes, estos, dependen en su gran mayoría del comportamiento de la interfaz electrodo-electrolito(Rousar,1889) y esta interfaz a su vez se ve afectada por la cinética de los electrodos, su estructura física, la geometría de la celda y el tipo de electrolito utilizado (Kordesh y Simader, 1996), a continuación se enumeran los de mayor relevancia:

Sobrevoltaje de activación ( $v_{act}$ ): es una pérdida motivada por el hecho de estar limitada la velocidad de transferencia de carga. La elección de un catalizador adecuado y el incremento de la temperatura de operación pueden disminuir el valor de este Sobrevoltaje (Lopez, 2000), la estimación del valor de esta irreversibilidad se da por la ecuación de Butler–Volmer (Dalea y Salehfarb, 2008).

$$v_{act,cat} = \frac{RT_{cat}}{\alpha_{cat}F} \operatorname{arcsinh} \frac{i}{2i_{0,cat}} \quad (14)$$

$$v_{act,an} = \frac{RT_{an}}{\alpha_{an}F} \operatorname{arcsinh} \frac{i}{2i_{0,an}} \quad (15)$$

Donde  $\alpha_{an} = 2$ ,  $\alpha_{cat} = 0.5$  además  $i_{0,cat}$  y  $i_{0,an}$  tienen valores según la literatura de  $1 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$  y  $1 \times 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ .

Sobrevoltaje de difusión ( $v_{dif}$ ): es debido a las diferencias de voltajes que aparecen como consecuencia de procesos difusivos (gradientes de presión, cambios en la velocidad de difusión de líquidos y gases). El retraso en alcanzar condiciones estacionarias o bien, la ausencia de condiciones de equilibrio, son el

origen de diferencias de concentración de electrolito. Otros parámetros que afectan a éste sobrevoltaje son la porosidad de los materiales (con influencia en el flujo de gases y líquidos) o la permeabilidad de las membranas (con influencia sobre el flujo iónico). Esta irreversibilidad se calcula con la ecuación de Nernst.

$$v_{dif} = \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) \quad (16)$$

Donde  $p_{H_2}$ ,  $p_{O_2}$  y  $p_{H_2O}$  son la presión del agua el oxígeno y el hidrógeno en la celda. Sobrevoltaje óhmico ( $v_{ohm}$ ): está directamente relacionado con la caída de voltaje producida al circular una intensidad a través de un medio con una determinada resistencia eléctrica. La resistencia óhmica de los electrodos y del electrolito muestra un comportamiento acorde con la ley de Ohm, para una celda electrolítica de membrana se puede expresar como:

$$v_{ohm} = \frac{\varphi}{\sigma} i \quad (17)$$

Donde  $\varphi$  es el espesor de la membrana,  $\sigma$  es la conductividad de la membrana y  $i$  es la corriente que transita por la celda por unidad de área.

El modelo teórico desarrollado en este trabajo tiene como objetivo expresar la relación entre el voltaje de la celda y la corriente aplicada a la misma. Ahora como el voltaje mínimo para que la electrolisis se pueda dar es  $U_{rev}$  a este le sumaremos los sobrevoltajes y encontraremos el voltaje de trabajo:

$$U = U_{rev} + v_{act,cat} + v_{act,an} + v_{dif} + v_{ohm} \quad (18)$$

$$U = U_{rev} + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{p_{H_2} * p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) + \frac{RT_{cat}}{\alpha_{cat} F} \operatorname{arcsinh} \frac{i}{2i_{0,cat}} + \frac{RT_{an}}{\alpha_{an} F} \operatorname{arcsinh} \frac{i}{2i_{0,an}} + \frac{\varphi}{\sigma} i \quad (19)$$

Por teoría eléctrica se sabe que La potencia consumida por el electrolizador ( $W_T$ ) es igual al producto de la diferencia de potencia total ( $U$ ) y la intensidad que atraviesa esta ( $I$ ) ahora en nuestro caso agregamos el número total de celdas ( $N$ ) que se obtiene al multiplicar el número de celdas conectadas en serie ( $N_C$ ) por el número de series de celdas conectadas en paralelo ( $N_R$ ).

$$w_T = NiU \quad (20)$$

$$N = N_C N_R \quad (21)$$

Fijando la temperatura del electrolito ( $T$ ) esta parte consta de 2 ecuaciones (19 y 20) con 2 incógnitas ( $U$ ,  $i$ ) y su resolución determina el punto de funcionamiento del electrolizador

#### 4.3.4 CALCULOS DE CAUDALES DE PROCESO

Una vez resuelta la parte eléctrica y obtenida la intensidad que atraviesa la celda electrolítica ( $i$ ) se calcula el caudal de hidrógeno producido mediante la siguiente expresión:

$$m_{H_2} = \eta_F \frac{\dot{N}I}{zF} \quad (22)$$

Donde  $\eta_F$  es el rendimiento de Faraday que tiene en cuenta el efecto de las corrientes parásitas,  $N$  es el número total de celdas del electrolizador  $z$  es el número de electrones transferidos en la reacción de la electrólisis del agua ( $z=2$ ) y  $F$  es la constante de Faraday.



En este modelo se utiliza la expresión del rendimiento de Faraday ( $\eta_F$ ) (Ulleberg, Ovstein), donde se pone de manifiesto la dependencia de dicho rendimiento con la temperatura ( $T$ ).

$$\eta_f = f_2 \frac{(I/A)^2}{f_1 + (I/A)^2} \quad (23)$$

La dependencia de  $f_1$  y  $f_2$  con la temperatura de electrolito ( $T$ ) se obtienen experimentalmente mediante mediciones en diferentes puntos de funcionamiento, obteniendo expresiones poli nómicas de la temperatura.

$$f(T) = m_{f_1} T + n_{f_1} \quad (24)$$

$$f_2(T) = e_1 + e_2 T + e_3 T^2 \quad (25)$$

Para finalizar el caudal de agua que es necesaria para la electrólisis ( $m_{H_2O}$ ) y el caudal de oxígeno que se produce ( $m_{O_2}$ ) viene dado por la estequiometria de la reacción:

$$m_{H_2O} = \dot{m}_{H_2} \quad (26)$$

$$m_{O_2} = \frac{1}{2} \dot{m}_{H_2} \quad (27)$$

## 5. METODOLOGÍA

El proyecto propuesto trata del diseño e implementación de un dispositivo que reduzca el consumo de combustible (gasolina), en motores de combustión interna, este dispositivo funcionara con los principios básicos de la electroquímica (electrólisis), en donde la fuente alternativa será el hidrógeno (producido a partir de la electrolisis).

Para realizar este proyecto fue necesario llevar a cabo una serie de pasos organizados que permitieron cumplir a cabalidad con los objetivos propuestos en un periodo de seis meses, la investigación se realizó principalmente en dos lugares, los laboratorios de la Universidad de Cartagena y la vía que comunica Cartagena-Bayunca(la cordialidad).

Hay que tener en cuenta que esta investigación fue de tipo experimental-descriptiva, pues se realizaron una serie de pruebas en el equipo para obtener las condiciones óptimas y se analizaron cada una de las variables a manipular

### 5.1 DISEÑO DEL DISPOSITIVO

Se analizó la configuración en espiral teniendo en cuenta el espacio disponible por el automóvil, además de la eficiencia de producción de combustible (Hidrógeno) (C.L.Mantell,1945), esto se llevó a cabo teniendo en cuenta los principios termodinámicos y electroquímicos así como la ley de Faraday que nos permitió determinar el voltaje necesario para producir la electrolisis y el área requerida. Parámetros tales como el voltaje ideal, fue obtenido a través de una serie de pruebas utilizando un regulador en donde se suministró diferentes voltajes al diseño. La temperatura también jugó un papel importante, pues es una variable en el proceso, pero para esta investigación se tomó una temperatura fija, la cual fue

la temperatura ambiente de Cartagena aproximadamente 32°C, como parámetro se encontró la cantidad de corriente a suministrar para esto se hizo uso de un dispositivo (Amperímetro) a través del cual se obtuvieron los valores necesarios para construir un gráfico corriente vs producción de hidrógeno.

## **5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL**

El efecto del amperaje sobre la producción de hidrógeno en el proceso de electrólisis fue estudiado. Cinco niveles de amperaje, 2, 4, 6, 8 y 10 amperios, fueron estudiados. El diseño experimental fue de medidas repetitivas simple, donde la variable dependiente fue la producción de hidrógeno, que se midió por medio de la captura de los gases hidrógeno y oxígeno en un beaker que se encontraba sumergido boca abajo, y que por burbujeo se retuvieron a medida que el volumen del gas aumento. Se procedió a mantener el nivel del agua externo igual al interno del beaker, esto con el fin de mantener una presión interna igual a la atmosférica. Se colocó en marcha el cronometro en el momento que ingreso la primera burbuja y se detuvo cuando se alcanzó el volumen del beaker; Por medio de la ley de los gases ideales se obtuvo la cantidad de moles totales de agua consumidas, finalmente por métodos estequiométricos se calculó la cantidad de hidrógeno producido. En esta investigación la variable independiente fue el amperaje y la dependiente la producción de hidrógeno

## **5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO**

En primer lugar se realizó una revisión mecánica interna del auto con el fin de descartar cualquier tipo de falla a la hora del uso del dispositivo; para la instalación del sistema en el automóvil se tuvo en cuenta parámetros tales como el espacio del automóvil y la conexión eléctrica. Las pruebas se realizaron en un auto base, en este se efectuó el montaje teniendo en cuenta el flujo de hidrogeno a

mezclarse con la gasolina; Se implementó un mecanismo de apagado manual para evitar el consumo de energía (hidrógeno), en el momento en que no se estaba haciendo uso del vehículo, además se tomó muy en cuenta la seguridad en el dispositivo.

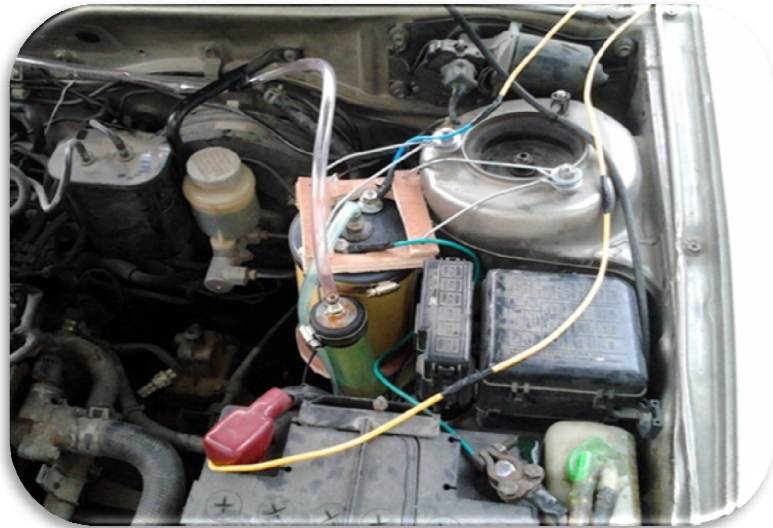
Figura 1. Espacio interno para la ubicación del dispositivo.



*Fuente: obtenida en la presente investigación*

En la figura 1, se observa el espacio disponible para la instalación del dispositivo, el cual fue ubicado al lado del soporte de los amortiguadores de la llanta derecha; El dispositivo se aseguró con un soporte en alambre metálico, ajustado con los tornillos de los amortiguadores.

Figura 2. Sistema electrolizador instalado en el carro.



*Fuente: obtenida en la presente investigación*

En la figura 2, se encuentra el dispositivo instalado y listo para su funcionamiento, cabe resaltar que el burbujeador se ajustó con una abrazadera de plástico al lado del recipiente del electrolizador.

Figura 3. Sistema de encendido manual y fusible.



*Fuente: obtenida en la presente investigación*

En la figura 3, por motivos de seguridad y consumo de la batería del vehículo, se instaló un sistema de apagado manual con el fin de evitar consumo extra por

parte del dispositivo, al lado del interruptor, se instaló un sistema de protección de sobre consumo, el cual consistió en un fusible de 30 A, esto con el objetivo de proteger al vehículo y al dispositivo de un consumo superior y por ende un desgaste mucho mayor de la batería.

#### **5.4 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS**

Se tomó en cuenta la distancia recorrida por el automóvil en la tercera etapa, esto con el fin de poner en marcha el dispositivo hasta haber alcanzado la distancia anterior y así realizar una comparación entre la cantidad de combustible consumido (gasolina), antes y después de la implementación de este dispositivo para así poder obtener su eficiencia. Se estableció una distancia de treinta y dos kilómetros con y sin el dispositivo, los datos fueron obtenidos cada minuto durante media hora, dichos datos fueron tiempo, kilometraje, velocidad y amperaje. Luego se procedió a tabular la información en gráficas y tablas, realizando comparaciones entre el funcionamiento del auto sin el dispositivo y haciendo uso de este. En el proyecto se utilizaron distintos equipos como lo fueron fuente reguladora voltaje-amperaje, multímetro, tacómetro del automóvil, contador de consumo de combustible de la bomba de subestación, contador de kilómetros del automóvil. Cabe tener en cuenta que se analizaron las reducciones de emisiones contaminantes hacia la atmosfera.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 DISEÑO DEL ELECTROLIZADOR

Se procedió a realizar el diseño del sistema electrolizador que permitiera producir el caudal de hidrógeno necesario para disminuir el combustible consumido por el automóvil, lo que requirió de un análisis de los parámetros que influyen directamente en la producción del combustible secundario. Entre los parámetros a buscar encontramos el voltaje ideal y el voltaje termonéutro, los cuales serán el voltaje mínimo ideal necesario para que ocurra la electrólisis, y el voltaje mínimo real que asegura la producción del gas, además se tomó en cuenta la longitud del alambre de espesor 1/8 pulgadas, para determinar el número de vueltas del espiral y su consecuente volumen ocupado.

Utilizando las ecuaciones 8 y 9, además de las temperaturas 298 K (temperatura de referencia), y 308K (temperatura de trabajo), se realizó el cálculo de las entalpías y entropías para las tres sustancias (Agua, Hidrógeno y Oxígeno) a las temperatura de referencia y trabajo, luego se procedió a hallar los valores de cambio de entalpia y entropía, haciendo uso de las ecuaciones 10 y 11 junto con los datos de la tabla 2, encontrando los siguientes resultados:

#### Cambio de entalpia

Para el agua:

$$\Delta H_{AGUA} = 12400,8 \text{ J/mol} - 12071,5 \text{ J/mol} = 329,3 \text{ J/mol}$$

Para el hidrógeno:

$$\Delta H_{HIDRÓGENO} = 10032,3 \text{ J/mol} - 9741,3 \text{ J/mol} = 291 \text{ J/mol}$$

Para el oxígeno:

$$\Delta H_{OXIGENO} = 8097,8 \text{ J/mol} - 7800,9 \text{ J/mol} = 296,9 \text{ J/mol}$$

### Cambio de entropía

Para el agua:

$$\Delta S_{AGUA} = 63,8149 \text{ J/mol} \cdot \text{K} - 62,7279 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 1,087 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

Para el hidrógeno:

$$\Delta S_{HIDROGENO} = 143,9932 \text{ J/mol} \cdot \text{K} - 143,0328 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 0,9604 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

Para el oxígeno:

$$\Delta S_{OXIGENO} = 143,19014 \text{ J/mol} \cdot \text{K} - 142,2099 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 0,98024 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

Al instante se procedió a encontrar los valores de entalpia y entropía de reacción, haciendo uso de las ecuaciones 12 y 13, una vez obtenidos estos valores, se realizo el despeje del incremento de la energía de Gibbs utilizando la ecuación 7, finalmente reemplazando todos los valores en la ecuaciones 5 y 8, se determinó los valores de voltaje reversible y termómetro.

$$U_{rev} = 1,22056 \text{ J/C}$$

$$U_{tn} = 1,481 \text{ J/C}$$



Asumiendo un consumo en el auto de 6 galones en una distancia recorrida de 140 Km (datos reportados por el conductor del vehículo), se determinó la cantidad de galones por Km consumidos por el vehículo; con una velocidad promedio de 30 Km/h y con el consumo, se encontró el caudal consumido en galones por hora, además con valores promedios de la gasolina como densidad y peso molecular, se obtuvo el caudal necesario para disminuir el consumo de gasolina en un 10% :

$$n_{HIDROGENO} = 0,00107 \frac{mol}{s}$$

Posteriormente, haciendo uso de las ecuaciones 16 y 20, se encontró la potencia que consumiría el electrolizador; consecutivamente aplicando la ley de Ohm, la fórmula que define la resistencia de los materiales conductores (acero inoxidable) y conociendo que el material tiene un área transversal circular, se encontró la longitud de alambre necesaria para cada uno de los electrodos (cátodo y ánodo).

$$l = 2.96m$$

## 6.2 CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROLIZADOR

Para la construcción del electrolizador se requirió de un rodillo (Figura 1) que sirviera como herramienta principal para la creación de los electrodos en espiral, esta herramienta (rodillo), fue diseñada en base al diámetro exterior del electrodo mayor soportado sobre unas bases en madera que permitiera su ajuste y su movimiento, el sistema electrolizador consiste básicamente de los electrodos, la base de estos y el recipiente donde se instalarían. Hay que tener muy en cuenta a la hora de la construcción del electrolizador, las herramientas básicas (pinzas, rodillo de diámetros diferentes, base de rodillo, manivela, acrílico, alambre y recipiente a utilizar, que en este proyecto fue un tubo de PVC), que permitieron la construcción del sistema electrolizador.

Figura 4. Rodillo utilizado para construir los electrodos en espiral.



*Fuente: realizado durante la presente investigación*

### 6.2.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS ELECTRODOS Y SU BASE

El alambre de acero inoxidable número 8, se cortó a la medida calculada de 2,965 m, luego se pasó por el rodillo ajustándolo a la superficie externa de este con el fin que tomara la forma espiral, faltando 10 cm se detuvo el rodillo de movimiento manual y se extrajo el electrodo en espiral ya listo con una punta recta, lugar donde se tendrá lugar el contacto con la corriente de la batería, este proceso se realizó dos veces pues se necesitaba de dos electrodos con este diámetro.

Figura 5. Construcción de los electrodos.



*Fuente: realizado durante la presente investigación*

Luego de la fabricación de los dos electrodos externos se cambió el rodillo de diámetro mayor y se instaló el rodillo de diámetro menor para la fabricación de los electrodos internos, ejecutándose el mismo procedimiento anteriormente descrito. Cabe destacar que la construcción de estos electrodos se llevó con sumo cuidado, para garantizar la homogeneidad de estos y el diámetro (Figura 3).

Figura 6. Electrodo en espiral.



*Fuente: realizado durante la presente investigación*

Ya listos los electrodos se procedió a fabricar su base, para lo cual se tomó una lámina de acrílico transparente con dimensiones de 10 cm de ancho por 14,5 cm de largo, estas medidas fueron tomadas por las dimensiones de los electrodos, con el fin de ocupar el mínimo espacio requerido y con la certeza que resistiera a cualquier movimiento brusco, a esta lamina se le realizaron 64 agujeros de 1/8 pulgadas repartidos de la siguiente forma: 16 orificios en el lado derecho de la lámina, creando una columna descendiente, al lado izquierdo a una distancia de 7 cm de estos se realizaron 16 orificios más, en total se efectuaron 32 orificios por donde pasaron los dos electrodos externos, y para los electrodos internos se realizaron también 32 orificios, la distancia entre las columnas internas fue de 4cm, cabe destacar que entre los orificios, la distancia dejada fue 0,8 cm, distancia que consideramos suficiente y resistente (Ver Figuras 4 y 6).

Ya teniendo la base y los electrodos, se procedió a armar el sistema, aprovechando su forma en espiral se iba pasando por cada agujero enrollando los electrodos en la base, empezando por los electrodos internos y seguidos los externos.

Figura 7. Vista interna de los electrodos terminados.



*Fuente: realizado durante la presente investigación*

Figura 8. Vista frontal de los electrodos terminados.



*Fuente: realizado durante la presente investigación*

### 6.2.2 CONSTRUCCIÓN DEL CONTENEDOR DE LOS ELECTRODOS

Se construyó un recipiente en PVC donde se ubicaran los electrodos en forma de espiral. El recipiente tiene una salida para el gas producido y dos conectores que salen desde el interior, estas puntas permitirían el contacto de los electrodos para el suministro de corriente.

El recipiente es un tubo de PVC de 4 pulgadas de diámetro con una altura de 17,5 cm, se obtuvieron dos tapones de PVC de 4 pulgadas que serían las tapas del

cilindro, una de las tapas se pegó en la base del tubo con pegante especial de PVC, a la otra tapa se le realizaron dos orificios de 1/4 de pulgadas (ver Figura 5), por donde se pasan los conectores a los electrodos con la fuente de corriente, el material utilizado fue un tornillo el cual se ajustó con tuercas y contratueras, además un aislante entre las tuercas y la tapa, para evitar posibles fugas entre los orificios.

Figura 9. Vista frontal del electrolizador.



*Fuente: realizado durante la presente investigación*

### 6.3 EVALUACIÓN DEL AMPERAJE CONTRA CAUDAL DE HIDRÓGENO

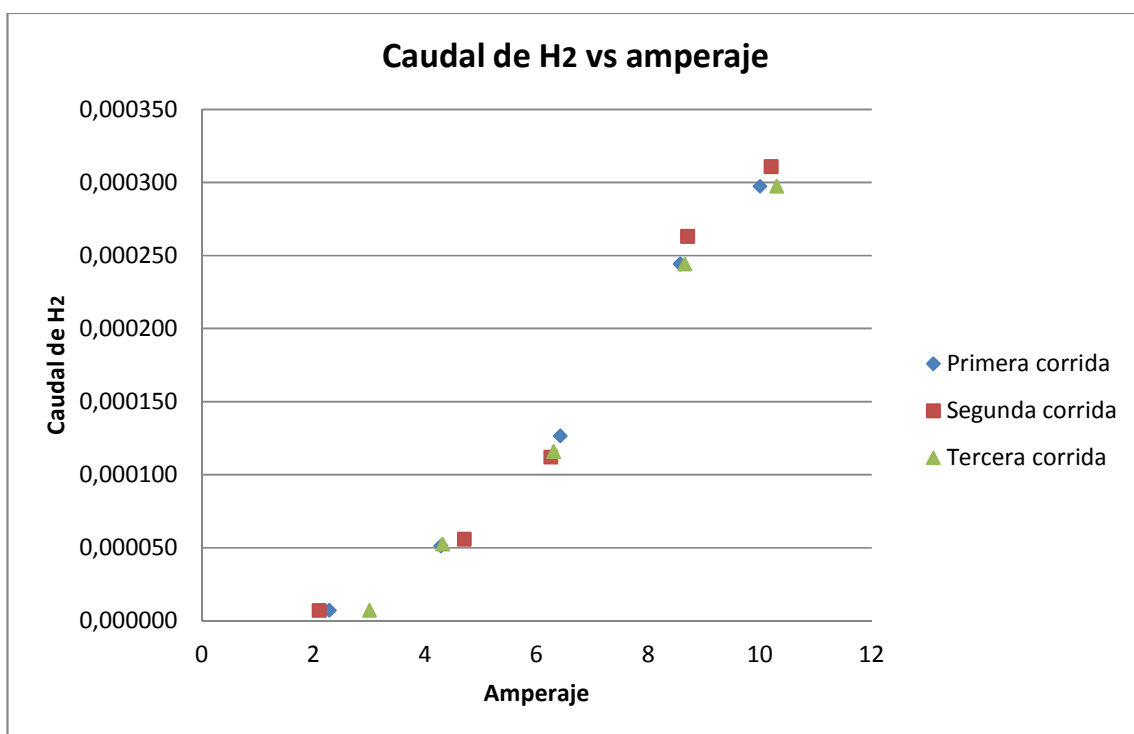
Un parámetro importante a la hora de la producción de hidrógeno con la celda electrolítica es el amperaje que consume esta, pues la corriente es la encargada de realizar la separación de los iones produciendo así los gases deseados; Sabemos que el voltaje mínimo para la producción de hidrogeno es aproximadamente igual a dos voltios, (por cálculos anteriormente descritos), y el amperaje se manipuló con la regulación de este voltaje, por ende se necesitó de una fuente reguladora de voltaje que permitiera suministrar diferentes valores y

por principios eléctricos, el amperaje consumido por el sistema también se viera alterado, pues una ley básica como la ley de ohm así lo describe.

El agua destilada pura no posee una conducción adecuada, por ende fue necesario agregar un electrólito que permitiera el paso de la corriente a suministrar, el electrolito utilizado fue KOH, por ser un compuesto poco corrosivo y de fácil adquisición. La concentración usada fue de un 0,23 M, esta concentración se calculó basándonos en la ley de ohm, teniendo los valores máximos de la fuente reguladora (14 V, 10 A), se obtuvo el valor de la resistencia que debería oponer el sistema-electrolito (1,4  $\Omega$ ), para obtener este valor se regulo el valor del voltaje hasta su valor máximo en agua destilada en donde la conducción era cero, a medida que agregábamos el electrolito, la resistencia al paso de corriente disminuía y por ende el amperaje consumido por el sistema aumentaba, este proceso de adición se realizó hasta que la corriente llego hasta su valor máximo, luego se obtuvo por diferencia de masas la cantidad de electrolito adicionado al sistema. A una concentración mayor a la indicada, el consumo sería muy grande y esto generaría calor extra al sistema, perdiéndose energía no necesaria lo que disminuiría la eficiencia del equipo.

Se realizaron en total tres corridas, en cada corrida se realizaron cinco experimentos con valores diferentes de amperaje que era controlado por el voltaje aplicado, para cada uno de los valores se recopiló información que nos describieron el comportamiento de las variables usadas, y con estos datos se pudo encontrar la variable de nuestro interés que fue el caudal obtenido de hidrógeno, los resultados representado en grafica nos arrojó lo siguientes:

Figura 10. Gráfica caudal vs amperaje.

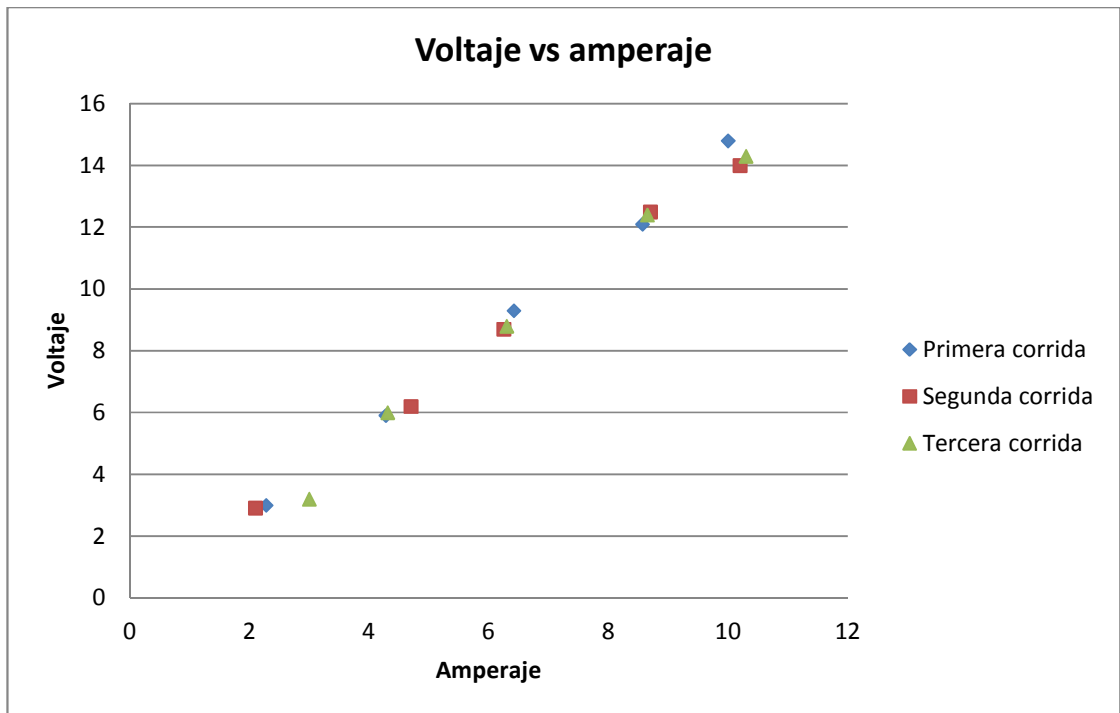


*Fuente: realizado durante la siguiente investigación*

Los resultados en esta grafica muestran un comportamiento que se puede representar por medio de una línea recta ( $y=0,0000894*x-0,00001015$ ), pues su tendencia tiende a mantenerse; Se observa que conforme aumenta el consumo también lo hace la producción de hidrógeno, pues estas dos variables son directamente proporcionales. En la investigación efectuada se pudo realizar análisis hasta valores de máximo 10 amperios, pues el equipo regulador no permitió sobrepasarnos de este límite; para nuestro diseño, el caudal consumido por el vehículo corresponde a un 0,0106963 mol gasolina/s, con un amperaje de 24 amperios y voltaje de 12 voltios.



Figura 11. Grafica voltaje vs amperaje.



*Fuente: realizado durante la presente investigación*

Esta grafica nos da un comportamiento con gran tendencia lineal en las tres corridas y es de esperarse, pues se debe cumplir los principios físicos de la eléctrica, en este caso la ley de ohm que predice que el voltaje es directamente proporcional al amperaje, las pequeñas diferencias se deben a que el multímetro utilizado se mantenía siempre oscilando y nunca se estabilizó.

El voltaje máximo fue de 14 voltios, esto debido a que el sistema solo nos permitía llegar hasta este valor, aunque el voltaje no es un parámetro relevante sobre la producción de hidrogeno, pues según los cálculos para que se empiece a dar la electrólisis se debe suministrar como mínimo 2 voltios aproximadamente, después de haber logrado esto, el consumo se convierte en el parámetro más importante. En nuestra investigación la forma con la que pudimos aumentar el valor de la corriente fue haciendo uso de la ley de ohm, obteniendo una fuente reguladora de voltaje y amperaje, otra forma pudo haber sido aumentar el electrolito, pero tuvimos en cuenta que la batería de un carro tiene un voltaje de 12 voltios, además teníamos como máximo un amperaje de 10 amperios, valor en el que la fuente trabajaba adecuadamente.

La recolección y medición del gas hidrógeno se realizó sumergiendo un beaker boca abajo dentro de un recipiente que contenía agua, y dentro del beaker introducíamos la manguera por donde salían los gases, a medida que se iban produciendo los gases se creaba un espacio dentro del beaker, aquí procedíamos a levantar un poco el beaker de tal forma que el nivel de agua interno fuera igual al externo, esto con el fin de garantizar una presión de 1 atm, cuando el gas ocupaba el volumen del beaker tomábamos el tiempo y por la ley de los gases ideales procedíamos a calcular el número de moles dentro de este volumen, luego con el tiempo que se demoró este proceso, calculábamos el caudal de los gases totales, de los cuales los  $\frac{2}{3}$  corresponden al  $H_2$  y  $\frac{1}{3}$  al  $O_2$ .

## 6.4 EVALUACIÓN DEL AHORRO DE COMBUSTIBLE FOSIL, POR MEDIO DEL CONSUMO DEL AUTO UNA VEZ INSTALADO EL SISTEMA ELECTROLIZADOR, PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE ESTE

### 6.4.1 REVISIÓN DEL AUTOMOVIL

Se realizó una breve revisión técnico-mecánica del automóvil, esto con el fin de descartar cualquier falla que posiblemente hubiera ocasionado la instalación del dispositivo. Esta supervisión se llevó a las 8:00 am del día 30 de junio. Una vez terminado este proceso, se procedió a realizar las pruebas en la vía Cartagena-Bayunca (la cordialidad).

### 6.4.2 INSTALACIÓN DEL SISTEMA ELECTROLIZADOR EN EL AUTOMOVIL

Figura 13. Instalación completa del sistema electrolizador



*Fuente: elaborada en la presente investigación*

Luego de realizar el proceso de revisión en el automóvil, se procedió a efectuar el respectivo montaje del sistema electrolizador en el auto, como el mostrado en la Figura 13. Se consideraron aspectos importantes como lo fueron:

- Espacio del automóvil: Se consideró que el lugar apropiado para realizar el montaje era al fondo del lado derecho del capot.
- Conexión eléctrica: Además del espacio del automóvil, se tomó en cuenta que el sistema quedara cerca de la fuente de energía (batería), teniendo en cuenta que en los alrededores del sistema, no existiera la presencia de circuitos eléctricos que se pudieran ver afectados por medio de la instalación de los dispositivos.

#### 6.4.3 RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos fueron tomados a partir de las 9:17 am del día 30 de junio; Los objetivos fundamentales de dichas pruebas fueron mantener una velocidad constante y establecer una distancia determinada para realizar comparaciones debido al consumo de combustible en el auto mediante el uso o no del sistema electrolizador. Los datos obtenidos se muestran seguidamente:

Tabla 3. Datos obtenidos sin el uso del electrolizador

Tiempo (min)	Kilometraje (km)	Velocidad (km/h)
1	0,70	40
2	1,35	40
3	1,90	40
4	2,85	60
5	3,90	60
6	5,40	60
7	6,22	60
8	7,00	60

---

Tabla 3. Datos obtenidos sin el uso del electrolizador

(Continuación)

9	7,80	60
10	8,70	60
11	9,70	60
12	10,65	60
13	11,70	60
14	12,60	60
15	13,40	35
16	13,80	30
17	14,70	60
18	15,85	60
19	16,70	60
20	17,70	60
21	18,70	60
22	19,00	55
23	20,55	60
24	21,50	60
25	22,55	40
26	23,45	60
27	24,55	60
28	25,50	60
29	26,35	60
30	27,40	60
31	28,45	60
32	29,35	60
33	30,30	60
34	31,30	40
35	31,70	60
36	32,00	40

---

*Fuente: obtenida durante la presente investigación*

Tabla 4. Datos obtenidos con el uso del electrolizador

Tiempo (min)	Kilometraje (km)	Velocidad (km/h)	Amperaje (A)
1	0,7	40	9,30
2	0,9	50	7,80
3	1,7	60	7,13
4	2,7	60	7,70
5	3,6	60	8,46
6	4,6	60	9,00
7	5,6	60	10,30
8	6,5	57	11,00
9	7,5	60	11,20
10	8,5	60	11,60
11	9,4	60	11,80
12	10,5	60	12,20
13	11,4	60	12,40
14	12,3	40	12,20
15	13,4	40	13,40
16	14,2	60	13,20
17	15,2	58	12,40
18	16,1	60	19,00
19	17,3	60	29,00
20	18,4	57	32,00
21	19,2	60	30,00
22	20,2	60	30,20
23	21,3	60	31,00
24	22,2	60	32,30
25	23,3	60	33,00
26	24,2	60	36,00
27	25,0	52	36,20
28	25,7	60	35,70
29	26,6	60	36,10
30	27,4	60	36,40
31	28,2	60	36,30
32	29,2	60	36,90
33	30,3	60	37,10
34	30,9	45	36,70
35	31,6	55	34,00
36	32,0	40	35,10

*Fuente: obtenida durante la presente investigación*

Los datos reportados en la tabla 4, muestran que el amperaje no se mantuvo constante, por el contrario, su crecimiento fue gradual con el tiempo, esto es debido a dos factores extras principalmente, como lo fue el aumento de temperatura interna del sistema y la disminución del nivel del agua, lo cual permitía que la concentración del electrolito aumentara y la corriente fluyera más fácilmente.

#### **6.4.4 DETERMINACIÓN DEL COMBUSTIBLE CONSUMIDO**

Una vez concluidas cada una de las pruebas, se hizo uso del contador de combustible proporcionado por la bomba de subestación de gasolina, para establecer el combustible consumido. Es apropiado resaltar que primero se llevó a cabo la prueba sin el uso del sistema, en donde se suministró el combustible al tanque del automóvil hasta que este estuviera completamente lleno, luego se hizo el respectivo recorrido y se tomó el dato suministrado por la estación de bombeo esto con el fin de determinar el consumo del automóvil sin el dispositivo, posteriormente se realizó el mismo procedimiento con el uso de este. En la prueba realizada sin el uso del sistema electrolizador se consumió una cantidad de 0,973 galones de combustible en un recorrido de aproximadamente 32 km en carretera abierta a una velocidad promedio de 60 km/h; en contraste, con el uso del sistema se consumió 0,75 galones de combustible en las mismas condiciones. Los datos anteriormente referenciados, reflejan una diferencia de 0,223 galones de combustible economizados con el uso del sistema electrolizador, lo cual es aproximadamente igual a un porcentaje del 23%.

El caudal consumido por el auto fue de 0,0106963 mol de gasolina/s, dado que el ahorro presentado fue de un 23%, lo cual equivale a un caudal de 0,0025 mol de gasolina/s, esta rata de producción fue reemplazada por el hidrógeno. Utilizando

el tiempo de duración de la prueba, la cantidad de gasolina que se reemplazó por hidrógeno fue de 5,4 mol, para corroborar este dato con los datos experimentales, promediamos los amperajes suministrados por la tabla 4, arrojando un valor promedio de 23 amperios, luego con la extrapolación de los datos de la figura 10, se obtiene un caudal producido por el electrolizador de 0,00204605 mol H<sub>2</sub>/s, consecuentemente se determinó la cantidad de hidrógeno que se produciría en el electrolizador de 4.5422 mol de hidrógeno, con un error del 15% con respecto al valor real.

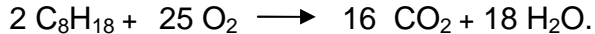


## 6.5 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE CO<sub>2</sub> QUE SE DEJARÍA DE EMITIR, A TRAVÉS DE MÉTODOS ESTEQUIOMÉTRICOS, PARA REALIZAR COMPARACIONES SIN EL USO DEL ELECTROLIZADOR

La reacción llevada en el interior del motor del auto se denomina combustión, es sabido que esta produce los gases CO<sub>2</sub>, CO si no se realiza completamente y H<sub>2</sub>O.

Si asumimos que el O<sub>2</sub> era un reactivo en exceso, que dicha reacción se llevó completamente y además que la gasolina está formada únicamente por C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, podremos calcular la cantidad de CO<sub>2</sub> que se logró dejar de emitir a la atmósfera haciendo uso del dispositivo.

La combustión se realiza mediante la siguiente reacción:



El volumen de combustible fósil que dejó de reaccionar fue de 0,223 galones o 0,84 Litros.

El octano tiene una densidad de 703 g/L, por consiguiente podemos calcular la masa de combustible que se economizó:

$$m = \rho * V$$

$$m = 703 \frac{\text{g}}{\text{L}} * 0,84 \text{ L} = 590,52 \text{ g}$$

Además, el octano tiene un peso molecular igual a 114,22 g/mol, así pues procedemos al cálculo de cantidad de sustancia.

$$n = \frac{m}{PM}$$
$$n = \frac{590,52 \text{ g}}{114,22 \text{ g/mol}} = 5,17 \text{ mol}$$

Realizando las proporciones respectivas:

$$\text{moles } CO_2 \text{ producidas} = 5,17 \text{ mol } C_8H_{18} \times \frac{16 \text{ mol } CO_2}{2 \text{ mol } C_8H_{18}}$$

$$\text{moles } CO_2 \text{ producidas} = 41,36 \text{ mol}$$

Determinando la masa, obtenemos:

$$m = n \times PM$$
$$m = 41,36 \text{ mol} \times 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 1819,84 \text{ g}$$

Utilizando valores promedios del uso de automóviles, además de conocer el tiempo en que se efectuaron las distintas pruebas, podemos determinar la cantidad de dióxido de carbono que se dejaría de emitir a la atmosfera en un tiempo de un año, dicho valor estaría en el orden de 2,656 Toneladas.

## 7. CONCLUSIONES

Durante la evaluación y cumplimiento de los objetivos a cumplir, pudimos observar una serie de eventos como:

La construcción del sistema electrolizador resulto relativamente económica, teniendo en cuenta los materiales utilizados, cabe destacar que el alambre de acero inoxidable utilizado para el sistema no sufrió un grado de corrosión perceptible en el periodo de realización de las pruebas, ver figura 14.

Según los experimentos realizados, el amperaje y voltaje mostraron un comportamiento proporcional, esto se ve reflejado por medio de la ley de ohm la cual describe que estas dos variables se relacionan directamente; en lo relacionado con la producción de hidrógeno, se determinó que aumentaba a medida que el consumo de amperaje del dispositivo era mayor.

La concentración ideal del electrolito (KOH), fue 0,23 M, esto se logró después de realizar una serie de pruebas donde se tenía como propósito lograr una conducción eléctrica apropiada, además de realizar los experimentos en los rangos definidos, lo anterior teniendo en cuenta términos de potencia de la fuente reguladora de voltaje y amperaje.

El automóvil mostro un comportamiento interno igual al momento de la instalación y puesta en marcha del sistema electrolizador, no se observó ningún daño ni ruido en el motor, además el conductor expreso la comodidad con respecto al uso del dispositivo.

Con el uso del sistema electrolizador, se logró una reducción del 23% en el consumo de combustible y se dejó de emitir contaminantes de dióxido de carbono en un valor de 1819,54 g en las condiciones de trabajo, esto conlleva a exponer que este sistema se convierte en una opción viable para la disminución de gases contaminantes hacia la atmosfera.

Las limitaciones de este estudio, se reflejan en el uso de un dispositivo (modulador) que permita regular el consumo del sistema electrolizador, debido a que en el momento de la puesta en marcha del sistema, el dispositivo electrolítico aumento considerablemente su consumo.

## 8. RECOMENDACIONES

Según los estudios y argumentos previos, es pertinente recomendar para futuras investigaciones a trabajar:

- Hacer uso de un dispositivo (modulador) que permita regular el amperaje del dispositivo, de esta manera se permitirá controlar el consumo del equipo, evitando peligros en el sistema interno del auto.
- Tener en cuenta al momento de la realización del diseño del sistema electrolizador, la instalación de un tanque de subestación al dispositivo, esto con el fin de mantener un nivel constante de agua en el proceso de electrolisis.
- Analizar el uso de materiales diferentes al acero inoxidable para la construcción del electrolizador, que presenten una conductividad eléctrica mayor y que posean propiedades físicas igual o mejor a las del material usado.
- Realizar las pruebas en una vía que tenga un acceso menos congestionado a la estación de combustible, con el objetivo de que el error que se podría ocasionar mientras se accede a esta sea menos considerable.
- Realizar un estudio de la eficiencia y vida media de la batería, una vez instalado el sistema electrolizador.
- Analizar el uso del sistema electrolizador con automóviles cuya fuente principal de energía sea distinta a la gasolina (gas natural, diesel).
- Efectuar las pruebas a distancias mayores a la establecida en la presente investigación.

## REFERENCIAS

Andrews John, ShabaniBahman "**Re-envisioning the role of hydrogen in a sustainable energy Economy**"; School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia; Received 24 July 2011, Received in revised form 26 September 2011; Accepted 27 September 2011.

BıyıkođluAtilla "**Review of proton exchange membrane fuel cell models**"; Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering and Architecture, Gazi University Maltepe 06570 Ankara/Turkey; Received 25 August 2004; received in revised form 8 February 2005; accepted 9 May 2005

Chaurasia, Yuji Ando, Tadayoshi Tanaka "**Regenerative fuel cell with chemical reactions**"; Research Institute for Energy Utilization, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba West, Tsukuba 305-8569, Japan Received 3 October 2001; accepted 7 February 2002.

CormosCalin-Cristian; "**Hydrogen production from fossil fuels with carbon capture and storage based on chemical looping systems**"; 2011.

Ding Juanjuan, Zhang Wenping "**The Analysis to the Influence of Carbon Dioxide Emissions in Different Countries**"; Energy Procedia, Volume 5, Pages 2426-2431; 2011.

Hazzim F. Abbas, W.M.A. Wan Daud "**Hydrogen production by methane decomposition: A review**"; Department of Chemical Engineering, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia; Received 19 September 2009, Received in revised form 9 November 2009, Accepted 9 November 2009; Available online 27 November 2009.

KamaruzzamanSopian, Wan Ramli Wan Daud "**Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells**"; Department of Mechanical and Material Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor DarulEhsan, 43600 UKM Bangi, Selangor DarulEhsan, Malaysia Available online 17 October 2005.

Kelly Nelson, Thomas L. Gibson, Mei Cai, James A. Spearot, David B. Ouwkerk "**Development of a renewable hydrogen economy: Optimization of existing technologies**"; International Journal of energy, Volume 35, Issue 3, Pages 892-899. February 2010.

Kopasz John P “**Fuel cells and odorants for hydrogen**”; Argonne National Laboratory, 9700 South Cass Avenue, Argonne, IL 60439, USA Received 25 October 2006; received in revised form 2 November 2006; accepted 2 November 2006 Available online 26 December 2006.

Kriston Akos, Tamás Szabó, György Inzelt “**The marriage of car sharing and hydrogen economy: A possible solution to the main problems of urban living**”

International Journal of Hydrogen Energy, Volume 35, Issue 23, Pages 12697-12708; December 2010.

Martinez-Frias Joel, Ai Quoc, Pham, Salvador Aceves M “**A natural gas-assisted steam electrolyzer for high-efficiency production of Hydrogen**” Original; Revista Internacional de Hidrogeno Energia, Volumen 28, Numero 5, Paginas 483-490; mayo 2003.

Prem Kumar Sivasubramanian, Ramaraja P. Ramasamy, Francisco J. Freire, Charles E. Holland, John W. Weidner “**Electrochemical hydrogen production from thermochemical cycles using a proton exchange membrane electrolyze**”; Journal of Hydrogen Energy, Volume 32, Issue 4, Pages 463-468; March 2007.

Sabine Fuss, Jana Szolgayová “**Fuel price and technological uncertainty in a real options model for electricity planning**”; Energy, Volume 87, Issue 9, Pages 2938-2944; September 2010.

Semelsberger Troy, Borup Rodney L “**Fuel effects on start-up energy and efficiency for automotive PEM fuel cell systems**”; Materials Science & Technology Division, Los Alamos National Laboratory, P.O. Box 1663, Mail Stop J579, Los Alamos, NM 87545, USA; Received 14 July 2004; received in revised form 8 October 2004; accepted 1 November 2004.

Shuofeng Wang, Changwei Ji, Jian Zhang, Bo Zhang “**Improving the performance of a gasoline engine with the addition of hydrogeneoxygen mixtures**”; College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, PR China; Received 6 April 2011, Received in revised form 20 May 2011, Accepted 21 May 2011; Available online 22 June 2011.

Thounthong Phatiphat, Stéphane Raël, Bernard Davat “**Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle**”; Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), GREEN, CNRS (UMR 7037) 2, Avenue de la Forêt de Haye, 54516 Vandoeuvre-lès-Nancy, France Received 15 May 2005.

Winter Carl-Jochen “**Hydrogenenergy — Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change**” International Journal of Hydrogen Energy, Volume 34, Issue 14, Supplement 1, Pages S1-S52 July 2009.

Vezirođlu T.N, I. Gürkan, M.M. Padki“**Remediation of greenhouse problem through replacement of fossil fuels by hydrogen**” International Journal of Hydrogen Energy, Volume 14, Issue 4, Pages 257-266; 1989.

Verhelst S., P. Maesschalck, N. Rombaut, R. Sieren“**Efficiency comparison between hydrogen and gasoline, on a bi-fuel hydrogen/gasoline engine**”, 2009.

Wishart J, Z. Dong\*, M. Secanell“**Optimization of a PEM fuel cell system based on empirical data and a generalized electrochemical semi-empirical model**”; Department of Mechanical Engineering and Institute for Integrated Energy Systems, University of Victoria, Victoria, BC, Canada V8W 3P6, Received 10 March 2006; received in revised form 16 May 2006; accepted 16 May 2006

ZhangHoucheng, Guoxing Lin, JincanChen“**Evaluation and calculation on the efficiency of a water electrolysis system for hydrogen production**”; Department of Physics and Institute of Theoretical Physics and Astrophysics, Xiamen University, Xiamen 361005, People’s Republic of China 2010.

ZhengJinyang , Xianxin Liu , Ping Xu , Pengfei Liu , Yongzhi Zhao , Jian Yang “**Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies**”; Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University, Tuzla, Istanbul 34956, Turkey, Clean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL 33124, USA; Received 15 November 2010, Received in revised form 21 February 2011; Accepted 24 February 2011.

Zuo-yu Sun, Fu-Shui Liu, Xing-hua Liu, Bai-gang Sun, Da-Wei Sun “**Research and development of hydrogen fuelled engines in China**”; School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, PR China; Received 19 July 2011, Received in revised form 14 September 2011; Accepted 27 September 2011.



## ANEXO A: EQUIPO PARA LA FABRICACIÓN DE LOS ELECTRODOS

Figura 1: vista superior izquierda del rodillo con su base



Figura 2: vista superior del rodillo y ranura de ajuste



Figura 3: vista superior derecho del rodillo con su manivela



Figura 4: vista frontal del rodillo con ranura inferior de paso del alambre



Figura 5: rodillo en la fase inicial del funcionamiento



Figura 6: rodillo en la fase final del funcionamiento



## ANEXO B: BURBUJEADOR

El burbujeador es un equipo extra de nuestro tema de investigación que se utilizó como medida de precaución en caso de algún tipo de combustión fuera del motor, esto con el fin de no dañar el electrolizador, y como segundo propósito, para que sirviera de filtro y el gas producido no tuviera partículas de arrastre que pudieran de alguna forma dañar el sistema interno del motor.

El burbujeador cuenta con una entrada en la parte inferior por donde se burbujea los gases producidos en la celda electrolítica, traspasan una columna de agua la cual sirve de filtro purificador, y en la parte superior cuenta con la salida de los gases. En caso de alguna combustión inversa, esta se llevaría a cabo dentro del burbujeador con un límite de espacio muy pequeño, lo cual no ocasionaría mayor daño, por lo tanto sirve como medio de seguridad para evitar daño al equipo electrolizador y al automóvil.

Figura 7: vista simétrica del burbujeador



Figura 8: Burbujeador instalado



Figura 9: Burbujeador en funcionamiento



Figura 10: burbujeador y electrolizador instalado



## ANEXO C: CONDICIONES EXPERIMENTALES

Figura 11: Velocidad promedio del tacómetro



Figura 12: visión delantera de la vía



Figura 13: visión trasera de la vía



## ANEXO D: EVALUACIÓN ECONOMICA

El precio de la gasolina para el presente mes de Julio del 2012, se registra en 8.708,30 pesos por galón (datos extraídos de la página [www.minminas.gov.co](http://www.minminas.gov.co)).

Realizando las diversas comparaciones y haciendo uso de cálculos sencillos, podemos determinar el ahorro económico que se obtiene al economizar el combustible fósil. Tomando como base esta investigación, podemos establecer que se obtuvo un ahorro económico de 1941,95 pesos.

Si utilizamos estos datos, para determinar ahorros aproximados que se pueden lograr viajando a ciudades como Barranquilla, Medellín y Bogotá, en las condiciones descritas en esta investigación, utilizando herramientas que nos permitan establecer distancias aproximadas entre cada uno de estas ciudades con nuestro lugar de residencia (Cartagena), obtenemos:

- La distancia aproximada a la ciudad de Barranquilla es 100,38 km, con el uso del sistema electrolizador se obtendría un ahorro de 6091,65 pesos aproximadamente.
- La distancia aproximada a la ciudad de Medellín es 703 km, con la utilización del sistema electrolizador se conseguiría un ahorro de 42662,21 pesos aproximadamente.
- La distancia a la ciudad de Bogotá es acerca de 1060 km, mediante la instalación del sistema se alcanzaría un ahorro de 64327,09 pesos aproximadamente,

## ANEXO E: DATOS AUTOMOVIL USADO

El automóvil utilizado para la realización de las distintas pruebas presenta las siguientes referencias:

Marca: Chevrolet

Modelo: Esteem

Año: 2001

Cilindraje: 1300 cc

Dirección: Hidráulica

Transmisión: Estándar.

## **ANEXO F: DATOS FUENTE REGULADORA**

La fuente utilizada para la realización de nuestra investigación, fue fabricada por la empresa ladelec ubicada en Barranquilla, Colombia. Entre sus especificaciones principales encontramos:

Potencia: 200 W

Voltaje: 1-14 V

Amperaje: 1 – 14 A

Transformador: 2 vueltas.



## **ANEXO G: MANUAL DE SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO DEL ELECTROLIZADOR**

El sistema electrolizador está fabricado por distintos materiales (Policloruro de vinilo, acero inoxidable y acero galvanizado) los cuales presentan un contacto directo con la solución electrolítica. Para realizar cualquier tipo de mantenimiento se recomienda:

- Desconectar toda la conexión eléctrica a la que este sujeto el sistema electrolizador.
- Es de especial cuidado la forma de los electrodos, no alterarla.
- Hacer uso de sustancias que no produzcan corrosión en los materiales anteriormente mencionados.

Para un buen funcionamiento del equipo se debe realizar periódicamente un mantenimiento preventivo, este mantenimiento se debe realizar de la siguiente forma.

### **Mantenimiento diario:**

- Revisar el sistema electrolizador y comprobar que existe un nivel de agua entre 85 y 90%, este nivel dependerá del uso del vehículo,

- Realizar la medición del electrolito haciendo uso del amperímetro, si el consumo se encuentra en un rango de 23 a 26 amperios el sistema se encuentra en su punto óptimo.

**Mantenimiento mensual:**

- Inspeccionar visualmente la corrosión que se tenga en los bornes del electrolizador.
- Examinar la conexión eléctrica, si los cables se encuentran sulfatados, corroídos o fracturados, proceder a cambiarlos inmediatamente.
- Limpiar los electrodos con detergente, agua y en lo posible una esponja abrasiva para retirar puntos de óxidos en el alambre.
- Cambiar la solución electrolítica, para evitar la oxidación que pueda desprenderse de los electrodos.
- Inspeccionar de las abrazaderas, en caso de que se encuentren en mal estado proceder a cambiarlas por una de la misma referencia.

En lo referente a la seguridad del sistema electrolizador se sugiere:

- Mantener el equipo con un nivel de agua superior al 75% e inferior al 90% de la altura del recipiente, esto con el fin de evitar un consumo exagerado de energía y traspaso de agua por llenado.

- Mantener siempre ajustadas las abrazaderas del equipo y la canastilla del sistema, para evitar un derrame del electrolito dentro del vehículo o una posible explosión.
- Mantener una concentración del electrolito cercana al establecido en el proyecto para evitar un sobreconsumo o una baja producción de combustible.

## ANEXO H: PLANOS DE LA BASE Y DEL ELECTROLIZADOR

Figura 14: soporte de electrodos (izquierda), con el electrodo central (derecha)

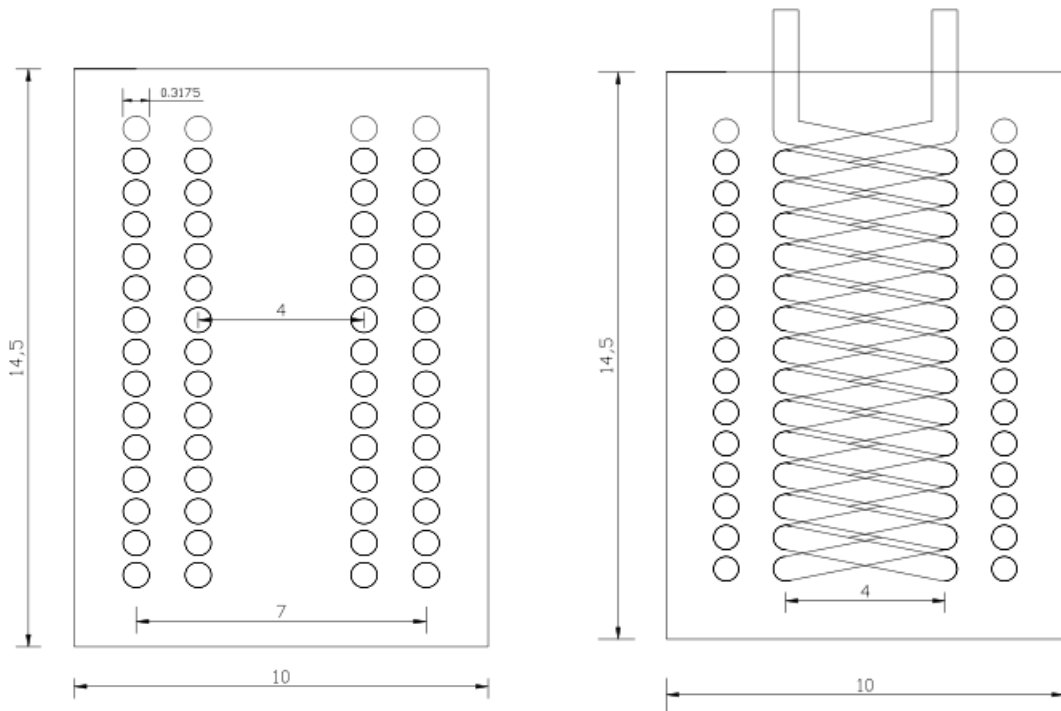


Figura 15: electrolizador completo

