



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ
MANUEL FÉLIX LÓPEZ**

DIRECCIÓN DE CARRERA: MEDIO AMBIENTE

**INFORME DE TRABAJO DE TITULACIÓN
PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
EN MEDIO AMBIENTE**

**MODALIDAD:
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**TEMA:
EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN MOTOR DE CUATRO
TIEMPOS, USANDO HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE**

**AUTORES:
ORTIZ SÁNCHEZ DANIEL FERNANDO
PARDO CASTILLO MAY CRISTHOFER**

**TUTOR:
ING. CARLOS DELGADO VILLAFUERTE**

CALCETA, MAYO 2019

DERECHOS DE AUTORÍA

Daniel Fernando Ortiz Sánchez y May Cristhofer Pardo Castillo, declaran bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual y su reglamento.

DANIEL F. ORTIZ SÁNCHEZ

MAY C. PARDO CASTILLO

CERTIFICACIÓN DE TUTOR

Carlos Delgado Villafuerte certifica haber tutelado el proyecto **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN MOTOR DE CUATRO TIEMPOS, USANDO HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE EN LA CARRERA DE MEDIO AMBIENTE DE LA ESPAM MFL**, que ha sido desarrollado por **Daniel Fernando Ortiz Sánchez y May Cristhofer Pardo Castillo**, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN ESPECIAL** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

ING. CARLOS DELGADO VILLAFUERTE

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

Los suscritos integrantes del tribunal correspondiente, declaran que han **APROBADO** el trabajo de titulación **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN MOTOR DE CUATRO TIEMPOS, USANDO HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE EN LA CARRERA DE MEDIO AMBIENTE DE LA ESPAM MFL**, que ha sido propuesto, desarrollado y sustentado por **Daniel Fernando Ortiz Sánchez y May Cristhofer Pardo Castillo**, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

Ing. Verónica Vera Villamil. Mg.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Jonathan Chicaiza Intriago. Mg

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Blga. María Fernanda Pincay. Mg.

PRESIDENTA DEL TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

La presente investigación le agradecemos a Dios, por darnos la fuerza necesaria para continuar y concluir con éxito este proceso académico.

A nuestros padres, quienes a lo largo de nuestras vidas nos han apoyado y motivado en nuestra formación universitaria, creyeron en nosotros en todo momento. Por su lucha insaciable y perseverancia, que han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar.

Al Ing. Carlos Delgado Villafuerte, nuestro Tutor, un agradecimiento especial por habernos brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, y por guiarnos durante todo el desarrollo de la investigación. Sin su ayuda no hubiésemos podido salir adelante.

A los Miembros del Tribunal de Trabajo de tesis, se agradece por su generosidad, conocimiento científica y valiosas críticas al discutir los resultados de este trabajo. Gracias por su permanente disposición y desinteresada ayuda.

Finalmente le agradecemos a la ESPAM-MFL por acogernos en sus aulas y enseñarnos todo lo que debíamos aprender para lograr lo que somos ahora.

DANIEL F. ORTIZ SÁNCHEZ

MAY C. PARDO CASTILLO

DEDICATORIA

A mi madre Yolanda, que desde pequeño me inculcó buena educación y buenos valores. A ella le debo mi vida, es un ángel que desde el cielo me ha cuidado y sé que ahora debe sentirse orgullosa de mí

A mi padre Efraín, mi ángel en la tierra, que con su lucha y sacrificio diario ha podido darme lo mejor para mí. A él mi gratitud eterna.

A mis amigos, que a pesar de la distancia han sabido ser soporte y ayuda emocional en mi vida. Ustedes son mis hermanos de corazón.

Y a las demás personas y familiares, un millón gracias por estar conmigo.

DANIEL F. ORTIZ SÁNCHEZ

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres y Hermanos.

A mis padres y mis hermanos, por ser incondicional siempre a pesar de toda dificultad, cuidándome y la fortaleza de seguir luchando para obtener mis sueños, por el bienestar y educación en todo momento, entregando su confianza en cada obstáculo en la vida que me encontraba a lo largo de mi vida.

A mis grandes amistades que conocí durante esta etapa siempre sacarme una sonrisa y ser testigos de este gran logro.

MAY C. PARDO CASTILLO

CONTENIDO GENERAL

| | |
|---|------|
| DERECHOS DE AUTORÍA | ii |
| CERTIFICACIÓN DE TUTOR | iii |
| APROBACIÓN DEL TRIBUNAL | iv |
| AGRADECIMIENTO | v |
| DEDICATORIA | vi |
| DEDICATORIA | vii |
| CONTENIDO GENERAL..... | viii |
| CONTENIDO DE CUADROS, GRÁFICOS Y FIGURAS | ix |
| RESUMEN | xi |
| ABSTRACT | xii |
| CAPÍTULO I. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1. Planteamiento y formulación del problema..... | 1 |
| 1.2. Justificación | 3 |
| 1.3. Objetivos | 4 |
| 1.3.1. Objetivo general | 4 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 4 |
| 1.4. Idea a defender | 4 |
| CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1. Fuentes de energía | 5 |
| 2.1. Consumo de combustibles fósiles y emisiones atmosféricas | 7 |
| 2.2. Hidrógeno | 7 |
| 2.3. La electrólisis | 11 |
| 2.4. Electrolito | 12 |
| 2.5. Generador de hidrógeno | 12 |
| 2.6. Sistema de combustión del motor con hidrógeno | 13 |
| 2.7. Almacenamiento del hidrógeno | 13 |

| | |
|--|-----------|
| 2.8. Motor de cuatro tiempos..... | 14 |
| CAPÍTULO III. DISEÑO METODOLÓGICO | 16 |
| 3.1. Ubicación | 16 |
| 3.2. Duración del trabajo | 16 |
| 3.3. Tipo de investigación..... | 16 |
| 3.4. Métodos, técnicas | 17 |
| 3.5. Variables de estudio..... | 17 |
| 3.6. Procedimientos | 18 |
| CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 26 |
| 4.1. Implementar generadores que permitan producir la concentración necesaria de hidrógeno para el funcionamiento del motor..... | 26 |
| 4.2. Comparación del rendimiento del motor usando hidrógeno y gasolina como combustibles | 43 |
| CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 47 |
| 5.1. Conclusiones | 47 |
| 5.2. Recomendaciones | 48 |
| BIBLIOGRAFÍA | 49 |
| ANEXOS | 53 |

CONTENIDO DE CUADROS, GRÁFICOS Y FIGURAS

CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 3. 1. Materiales para el diseño de un generador. | 20 |
| Cuadro 4. 1. Pruebas del hidróxido de sodio para la generación de hidrógeno..... | 32 |
| Cuadro 4. 2. Pruebas del bicarbonato de sodio para la generación de hidrógeno. | 33 |
| Cuadro 4. 3. Pruebas del hidróxido de potasio para la generación de hidrógeno. | 34 |
| Cuadro 4. 4. Pruebas del cloruro de sodio para la generación de hidrógeno. | 36 |
| Cuadro 4. 5. Concentraciones máximas de hidrógeno obtenido por cada electrolito. | 37 |
| Cuadro 4. 6. Cantidad de Hidrógeno producido por tres generadores de hidrógeno | 39 |

| | |
|--|----|
| Cuadro 4.7. Características del motor..... | 40 |
| Cuadro 4. 8. Medición de temperatura del motor..... | 43 |
| Cuadro 4. 9. Medición del ruido..... | 44 |
| Cuadro 4. 10. Medición del consumo de combustible usando gasolina e hidrógeno | 45 |

FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2. 1. Fuentes de extracción de hidrógeno..... | 9 |
| Figura 2. 2. Tecnologías de producción de hidrógeno | 10 |
| Figura 3. 1. Carrera de Ingeniería Ambiental “ESPAM MFL” | 16 |
| Figura 4. 1. Piezas de aluminio que sirven como electrodos..... | 27 |
| Figura 4. 2. Piezas de caucho..... | 28 |
| Figura 4. 3. Piezas de aluminio que sirven como electrodos neutrales..... | 29 |
| Figura 4. 4. Piezas de madera | 30 |
| Figura 4. 5. Esquema eléctrico..... | 41 |
| Figura 4. 6. Esquema del sistema total | 42 |

GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 4. 1. Medición de temperatura del motor usando hidrógeno y gasolina..... | 43 |
| Gráfico 4. 2. Medición de temperatura del motor usando hidrógeno y gasolina..... | 44 |
| Gráfico 4. 3. Consumo de combustible usando gasolina e hidrógeno. | 45 |

RESUMEN

La investigación tuvo como propósito evaluar el rendimiento de un motor de cuatro tiempos usando hidrógeno y gasolina como combustible. El experimento inició determinando la cantidad de generadores que permitan producir la concentración óptima de hidrógeno, para lo cual se emplearon cuatro tipos de electrolitos: hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio, cloruro de sodio e hidróxido de potasio. Siendo necesario la construcción de tres generadores y utilizar como electrolito la cantidad de 0,10 kg de hidróxido de potasio, cinco litros de agua, en un tiempo de 300 s y con una corriente de 8 A, para obtener la concentración máxima de 26.557 ppm de hidrógeno. Las variables en estudio fueron: la temperatura, el ruido y el consumo de combustible del motor. Los resultados en cuanto a la temperatura presentaron un valor máximo de 105,6 °C usando gasolina y 81,7 °C usando hidrógeno, por lo que el hidrógeno presentó un 29,25% más de eficiencia que la gasolina. La intensidad del ruido en el motor con el uso de gasolina presentó un valor máximo de 98,7 dB frente a 85,7 dB de ruido con el uso de hidrógeno, siendo el hidrógeno el combustible que presentó un 15,86 % de mayor eficiencia. Finalmente se evaluó el consumo de cada combustible, el motor a base de gasolina consumió 0,51 l/min frente a 0,60 l/min de hidrógeno, representando un 14,72 % de mayor consumo de hidrógeno, esto se debe porque el hidrógeno tiene mayor octanaje y volatilidad química que la gasolina.

PALABRAS CLAVES

Combustible alternativo, hidrógeno, generador de hidrógeno, hidrólisis, gasolina, eficiencia.

ABSTRACT

The purpose of the research was to evaluate the performance of a four-stroke engine using hydrogen and gasoline as fuel. The experiment began by determining the number of generators that generated the optimum concentration of hydrogen, for which the types of electrolytes were made: sodium hydroxide, sodium bicarbonate, sodium chloride and potassium hydroxide. The construction of three generators is required and the amount of 0.10 kg of potassium hydroxide, five liters of water, is used as an electrolyte in a time of 300 days with a current of 8 A, to obtain the maximum concentration of 26,557 ppm of hydrogen. The variables in the study were: temperature, noise and fuel consumption of the engine. The results in terms of temperature have a maximum value of 105.6 ° C using gasoline and 81.7 ° C using hydrogen, so hydrogen presents 29.25% more efficiency than gasoline. The intensity of noise in the engine with the use of gasoline presented a maximum value of 98.7 dB compared to 85.7 dB of noise with the use of hydrogen, with hydrogen being the fuel 15.86% higher efficiency. Finally the consumption of each fuel was evaluated, the engine and the petrol base consumed 0.51 l / min compared to 0.60 l / min of hydrogen, representing 14.72% of greater hydrogen consumption. Hydrogen has a higher octane rating and chemical volatility than gasoline.

KEY WORD

Alternative fuel, hydrogen, hydrogen generator, hydrolysis, gasoline, efficiency.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los motores de combustión interna son una preocupación a nivel mundial debido a la cantidad de emisiones de gases contaminantes al ambiente por causa del uso de combustibles fósiles (Cabrera y Figueroa, 2012). Entre los gases contaminantes que se emiten a la atmósfera, se tienen los siguientes: hidrocarburos, óxido de nitrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono (Chamarravi y Saavedra, 2013). Hay que tener en cuenta que la segunda causa de producción de dióxido de carbono es el uso de gasolina en automotores, ya que son los responsables de emitir cerca de 1.500 millones de toneladas de CO₂ al año (Sagñay, 2016).

Mundialmente, el transporte representa el 23% de las emisiones de gases de efecto invernadero que van hacia la atmósfera. De acuerdo al criterio de ExxonMobil (2013), la demanda automovilística se incrementará en un 40% hasta el año 2040, lo que significa un mayor consumo de combustibles fósiles y el agotamiento de recursos no renovables.

Según el informe divulgado por la Organización Mundial de la Salud, en América Latina, alrededor de 70.000 personas murieron en el año 2008, debido al desarrollo de enfermedades respiratorias causadas por los gases emitidos por los autos. Sin embargo, a pesar de las consecuencias, el uso de los automóviles sigue siendo indispensable en la vida diaria de las personas para poder transportarse (Sagñay, 2016).

Ecuador, es el país con mayor tasa de crecimiento en consumo de energía en transporte, que representa el 42% de la demanda. El transporte de carga liviana y pesada son los de mayor consumo de combustible, con un 18% y 42% respectivamente. El transporte de carga liviana presenta un consumo de 370 millones de galones de gasolina, mientras que el transporte de carga pesada

presenta un consumo de 763 millones de galones de diésel aproximadamente (Díaz y Gallardo, 2016).

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC] (2014), el transporte particular es el que más consume gasolina (86%), por lo tanto, contamina más que a diferencia del transporte público que usan diésel (2,65%). Las tres provincias que más utilizan combustible en Ecuador son: Guayas, Pichincha y Manabí respectivamente.

Dentro de este contexto, en el Ecuador existe escasez de motores que funcionen en base de energías alternativas o que utilicen otros tipos de combustibles como fuente primaria de su funcionamiento; tal como el hidrógeno, el cual es un elemento que produce bajos niveles de contaminación al momento de usarse como combustible (Arboleda y Campos, 2013).

En la ciudad de Calceta de la provincia de Manabí, no existen vehículos que posean un sistema de generación de hidrógeno para el funcionamiento del motor, ante lo cual se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuál es el rendimiento de un motor de cuatro tiempos usando hidrógeno como combustible?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Uno de los retos de la ingeniería ambiental es reducir el consumo de combustibles fósiles, para lograr, entre otras cosas, menores índices de emisiones de gases contaminantes provocados por los motores de combustión interna. En particular, se buscan soluciones que no involucren transformaciones físicas en los motores, y que, al mismo tiempo, mejoren la eficiencia del mismo.

De acuerdo a Peretti (2013), el hidrógeno es considerado el combustible del futuro, ya que, gracias a sus propiedades físicas y químicas, se caracteriza por ser un elemento renovable, abundante, no contaminante y que puede ayudar a optimizar la eficiencia de un motor convencional.

Al realizar esta investigación, se busca cumplir lo establecido en la Constitución de la República del Ecuador (2008) en su Art. 14, el cual menciona que: “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*”. De esta manera, se minimiza la contaminación ambiental al utilizar un combustible renovable, tal como se menciona en el Art. 413.- “El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua”.

Evaluar el rendimiento de un motor usando hidrógeno como combustible, permitirá determinar los beneficios de aplicar este combustible en motores de cuatro tiempos en variables de temperatura, ruido y consumo de combustible.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el rendimiento de un motor de cuatro tiempos usando hidrógeno como combustible.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar generadores que permitan producir la concentración necesaria de hidrógeno para el funcionamiento de un motor.
- Comparar el rendimiento del motor usando hidrógeno y gasolina como combustibles.

1.4. IDEA A DEFENDER

El uso de hidrógeno como combustible en un motor de cuatro tiempos, se comportará un 25 % más eficiente que con el uso de gasolina.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. FUENTES DE ENERGÍA

La energía es la capacidad para producir un trabajo que, a su vez, puede cambiar o poner en movimiento otros cuerpos (Oviedo, Badii, Guillen y Lugo, 2017).

Según Martínez y Caro (2011), las fuentes de energía se categorizan en: renovables y no renovables.

2.1.1. ENERGÍA NO RENOVABLE

La energía no renovable es un término genérico referido a aquellas fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en una cantidad limitada y que, una vez consumidas en su totalidad, no pueden sustituirse, ya que no existe sistema de producción o extracción viable, o la producción desde otras fuentes demasiado pequeña como para resultar útil a corto plazo (Cabrera y Figueroa, 2012).

De acuerdo a Martínez y Caro (2011), las fuentes de energía no renovable se dividen en dos grandes grupos:

- **Fuente de energía fósil:** La forma de energía que poseen los combustibles fósiles es energía química, que podemos aprovechar a partir de las reacciones de combustión Oviedo (2017). Se puede transformar en lo que habitualmente se denomina energía térmica (calefacción), energía eléctrica, energía cinética (a través de los motores de combustión interna), etc. Es utilizada en multitud de aplicaciones domésticas e industriales. Según De Lucas (2012), la energía fósil la constituyen:
- **Petróleo y sus derivados:** El petróleo está compuesto por una gran variedad de hidrocarburos líquidos que se mezclan con una gran variedad de impurezas. Por una serie de procesos, como puede ser la destilación se obtienen sus derivados: la gasolina, diésel, turbosina, lubricantes y asfaltos, entre otros (Martínez y Caro, 2011).

- **Gas natural:** El metano, es el principal componente de este recurso. Se encuentra en forma gaseosa, en los yacimientos o bien, formando parte de la mezcla de hidrocarburos como gas asociado (Martínez y Caro, 2011).
- **Carbón mineral:** Su componente principal es el carbono, que se encuentra en los grandes yacimientos del subsuelo. A nivel mundial este recurso es abundante Oviedo (2017). El problema del carbón es que durante su combustión causa demasiados problemas ecológicos, incluso más que el petróleo y sus derivados.
- **Energía Nuclear:** Se obtiene de la modificación de los núcleos de algunos átomos, muy pesados o muy ligeros. En las reacciones nucleares se libera una gran cantidad de energía debido a que parte de la masa de las partículas involucradas en el proceso, se transforma directamente en energía. Según el Consejo Nacional de Seguridad Nuclear de España [CSN] (2014) existen dos tipos de energía nuclear:
 - **Fisión:** Consiste en la desintegración de átomos pesados para obtener otros más ligeros. Es la energía asociada al uso del uranio.
 - **Fusión:** Es la reacción en la que dos núcleos muy ligeros (hidrógeno) se unen para formar un núcleo más pesado y estable, con gran desprendimiento de energía.

2.1.2. ENERGÍA RENOVABLE

Según Troncoso (2017), corresponden a las fuentes energéticas que no se consumen ni se agotan en una escala de tiempo humana. Entre estas fuentes de energías están: la hidráulica, la solar, la eólica y la de los océanos. Además, dependiendo de su forma de explotación, también pueden ser catalogadas como renovables la energía proveniente de la biomasa y la energía geotérmica.

Son aquellas cuyo potencial es inagotable, ya que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua, como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la Luna. Son fundamentalmente la energía hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica y las marinas (Martínez y Caro, 2011).

2.1. CONSUMO DE COMBUSTIBLES FÓSILES Y EMISIONES ATMOSFÉRICAS

El gran impacto ambiental en los motores de combustión interna, es el consumo de combustible fósil que, de acuerdo con el modelo energético actual, se basa en la práctica total en derivados del petróleo (gasolina, diésel). No obstante, en los últimos años se está produciendo una mejora significativa en la eficiencia de los motores y en el consumo específico de los vehículos (Cabrera y Figueroa, 2012). Así mismo, está comenzando a producirse una leve transición al uso de fuentes de energía algo más sostenibles en los vehículos (gas natural, hidrógeno, biocombustibles y electricidad). Por otra parte, las empresas de transporte también consumen energía en sus instalaciones para el mantenimiento y aparcamiento de vehículos a través de la calefacción y el consumo eléctrico de máquinas y equipos (De Lucas, 2012).

El consumo de combustible y de energía, tal y como se ha indicado anteriormente, trae como consecuencia, además de la eliminación de recursos naturales no renovables, otros impactos medioambientales asociados: la emisión de gases de efecto invernadero y la emisión de contaminantes (Troncoso, 2017).

2.2. HIDRÓGENO

El hidrógeno es un elemento químico representado por el símbolo H y con número atómico de 1 mol. En condiciones normales de presión y temperatura, es un gas diatómico (H_2) incoloro, insípido, no metálico y altamente inflamable. Con una masa atómica de 1,00794 μ , el hidrógeno es el elemento químico más ligero y es, también, el elemento más abundante, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia presente en el universo (Duque y Mazaquiza, 2013). Sin embargo, el hidrógeno elemental es muy escaso en la Tierra y es producido industrialmente a partir de hidrocarburos como, por ejemplo, el metano. El hidrógeno puede obtenerse a partir del agua por un proceso llamado electrólisis (Rodríguez, 2016).

El hidrógeno fue descubierto en el siglo XVII, sin embargo, su uso a nivel industrial no se dio hasta inicios del siglo XX. Esta hipótesis se deduce debido a

factores como su inexistencia de forma simple en la Tierra, la falta de tecnologías que permitieran su obtención de manera eficiente y económica, y el desconocimiento sobre sus posibles usos y aplicaciones (Carrasco y Rodríguez, 2010).

2.2.1. HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

En la búsqueda de opciones amigables con el ambiente, se ha investigado la utilidad del hidrógeno como combustible limpio para el reemplazo de los combustibles fósiles en motores de combustión interna. Se ha utilizado hidrógeno por sus cualidades tales como su alto número de octano (130), el cual mide la capacidad antidetonante del combustible, es decir, la capacidad de no sufrir combustión prematura o detonación a altos índices de compresión, en comparación a los de la gasolina (87) y el diésel (30). Otro aspecto importante es la energía mínima requerida para la ignición, la cual es de 0,017 mJ para el hidrógeno, valor por debajo de otros combustibles como el metano (0,29mJ) y la gasolina (0,24mJ). Otra de las ventajas de este combustible es su velocidad de quemado (2,65 m/s y 3,25 m/s), la cual indica que el hidrógeno se quema rápidamente, es decir, su combustión tiene poca duración (Díaz, Gonzáles y Gonzáles, 2017).

Uno de los principales beneficios de utilizar el hidrógeno en motores de combustión interna, es el hecho de que se aprovecha toda la experiencia tecnológica que se acumula en esta área (Ramos, 2008). Cabe señalar, que la configuración del motor de hidrógeno conceptualmente es igual a la de los motores de combustión interna, ya sean alternativos o clásicos.

2.2.2. GENERACIÓN DE HIDRÓGENO

Según Vásquez y Salinas (2018), el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, pero no se encuentra en su estado puro en nuestro planeta. Por lo tanto, este debe ser producido a través de variados procesos, los cuales se pueden clasificar en:

- **Termoquímicos:** usan calor y reacciones químicas para obtener el hidrógeno de combustibles convencionales o biomasa.

- **Electrolíticos:** el agua (H_2O) se disocia en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) usando electricidad.
- **Biológicos:** microorganismos, tales como bacterias y algas pueden generar hidrógeno por medio de procesos biológicos propios.
- **Otros procesos:** como la descomposición foto-catalítica y biológica del agua.

Actualmente, un 96 % del hidrógeno en el mundo se extrae a partir de combustibles fósiles y solo un 4 % a través del agua (Ursúa, Gandía y Sanchis, 2012).

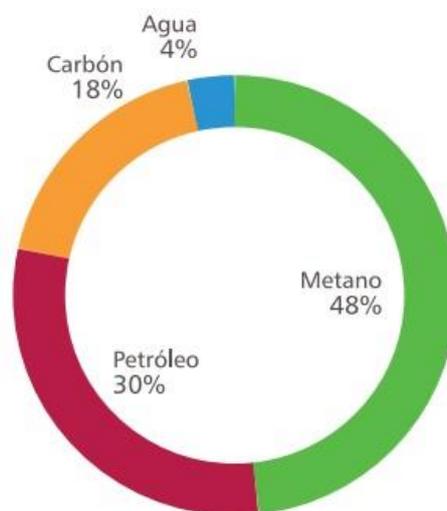


Figura 2. 1. Fuentes de extracción de hidrógeno
Fuente: International Energy Agency [IEA] (2015).

La producción mundial de hidrógeno se estima en 65 Mt/año y emite alrededor de 500 Mt $CO_2eq/año$ (IEA, 2015). Se proyecta que esta demanda se incrementará hasta alcanzar las 200 mil toneladas al año, debido a su uso en el transporte pronosticado para el 2030 y que los principales consumidores serán Japón, China y Corea del Sur (Ursúa *et al.*, 2012). Se prevé que, si se reemplazaran los combustibles fósiles por hidrógeno, su producción debería ser a partir de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), en ese caso, las emisiones de CO_2 por producción de H_2 se incrementarían significativamente.

Cabe destacar que, si bien el agua no es la principal fuente de producción de hidrógeno, por el momento se posiciona como la única alternativa para la producción de hidrógeno “verde” o renovable a gran escala.

Por otro lado, se está investigando el uso de energía solar concentrada para la utilización de calor y electricidad en procesos termoquímicos y electrolíticos, ya que para esto generalmente se utilizan combustibles fósiles. La Figura 2.2. muestra las tecnologías de producción de hidrógeno renovable.

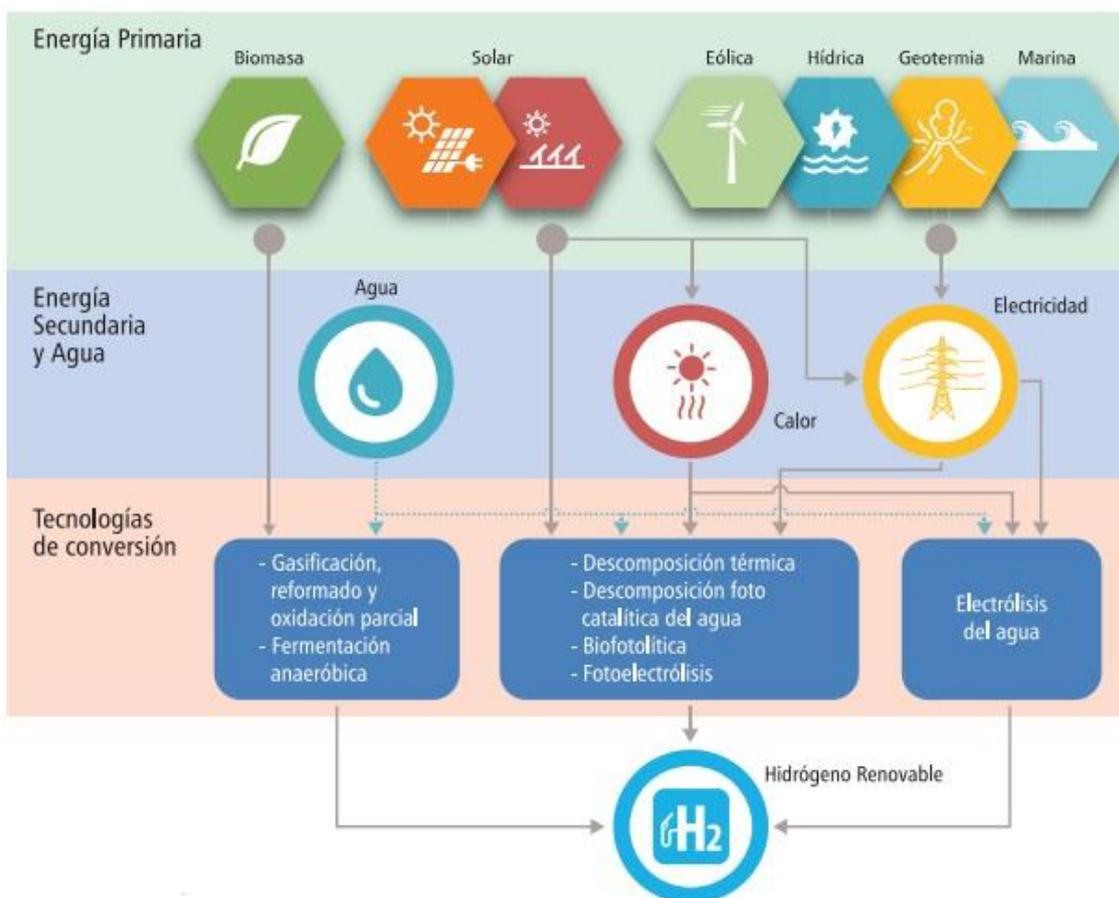


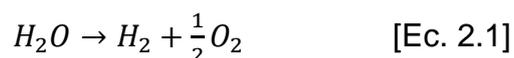
Figura 2. 2. Tecnologías de producción de hidrógeno
Fuente: (Gandia 2013).

2.3. LA ELECTRÓLISIS

Procede de dos sufijos, “electro” que hace referencia a electricidad y “lisis” que quiere decir división. A partir de la electrólisis se estudian procesos en que la energía eléctrica ocasiona cambios químicos en compuestos iónicos fundidos elevados al estado líquido, o en soluciones o mezclas homogéneas de electrolitos. En un proceso de electrólisis, la corriente eléctrica puede separar sustancias iónicas o soluciones con sustancias electrolíticas disueltas (Duque y Masaquiza, 2013).

El proceso de electrólisis para la obtención del hidrógeno, consiste en la descomposición de las moléculas de agua ($2H_2O$) en oxígeno (O_2) e hidrógeno ($2H_2$), mediante la circulación de una corriente eléctrica en el agua. Para optimizar la producción del hidrógeno obtenido por la electrólisis, es necesario modificar la conductividad del agua mediante un electrolito para que ayude a la velocidad de reacción (Díaz *et al.*, 2017).

A continuación, se muestra la ecuación del balance eléctrico del agua:



Cabe mencionar que el hidrógeno es formado en el cátodo, mientras que el oxígeno se forma en el ánodo; mejorando la producción al variar la composición del agua (añadiendo electrolitos aumenta la velocidad de reacción). Por el contrario, si lo que se requiere es la producción de hidrógeno puro, el proceso de la electrólisis es altamente efectiva, a pesar de que se obtenga en pocas cantidades (Cuesta, 2016).

De acuerdo a Flores (2016), la electrólisis tiene una eficiencia aproximada del 75%, teniendo en consideración que la eficiencia de la producción de energía eléctrica puede variar dependiendo del medio en que se produzca el proceso. Por tal razón, la eficiencia total para la producción de hidrógeno mediante el uso de la electrólisis está entre el 25 y 45% (en casos de fuentes de energías renovables suelen darse valores más bajos).

2.4. ELECTROLITO

Es cualquier sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico. Debido a que generalmente consisten de iones en solución, los electrolitos también son conocidos como soluciones iónicas (Duque y Masaquiza, 2013).

Comúnmente, los electrolitos existen como soluciones de ácidos, bases o sales. Las soluciones de electrolitos se forman normalmente cuando una sal se coloca en un solvente como el agua, y los componentes individuales se disocian debido a las interacciones entre las moléculas del solvente y el soluto, en un proceso denominado solvatación (Rodríguez, 2016).

2.5. GENERADOR DE HIDRÓGENO

Conocido como hidrolizador, celda de hidrógeno o generador de hidrógeno. Es un dispositivo que se emplea para mejorar el rendimiento de los motores de combustión interna de gas, gasolina, diésel, biodiesel y turbosina (Tamayo, Rosales, Guzmán y Pazmiño, 2016).

Según Benavides (2018), un generador de hidrógeno utiliza como materia prima agua y 12 voltios. El generador separa el hidrógeno el oxígeno del agua, de manera que el gas de hidrógeno puede ser utilizado en diversas aplicaciones, y pueden ser en los motores de: motos, camionetas, plantas de luz, excavadoras, trenes, barcos y aviones y aún más en el campo automotriz. El hidrógeno utilizado en automóviles puede aportar con la reducción de gases contaminantes (producto de la combustión).

Está compuesto por varias placas y láminas en donde se comunican con el electrolito que es suministrado por un conducto. Cuando al generador se le aplica un voltaje, la corriente que por el electrolito circula hace que se separe el hidrógeno y el oxígeno del agua en forma de gas mediante un proceso llamado electrólisis. Para ello se utiliza energía eléctrica que proviene de baterías de autos o pilas tradicionales (Tamayo *et al.*, 2016).

2.6. SISTEMA DE COMBUSTIÓN DEL MOTOR CON HIDRÓGENO

Los motores de combustión interna son máquinas que obtienen energía mecánica a través del proceso químico de combustión, resultado de la quema de un combustible dentro de la cámara de combustión. En principio, el ciclo que rige la mayoría de motores de combustión interna es el denominado ciclo Otto, comúnmente llamado motor de cuatro tiempos, el cual precisa de cuatro carreras de pistón (dos vueltas completas de cigüeñal) para completar el ciclo termodinámico de su combustión. Estos cuatro tiempos se deben a la admisión, compresión, combustión, y escape (Díaz, *et al.*, 2017).

En la admisión desciende el pistón absorbiendo la mezcla de aire y combustible. La válvula de escape permanece cerrada, mientras que la de admisión permanece abierta. En la etapa de compresión, la válvula de admisión se cierra en el momento en que termina el recorrido en la parte inferior, comprimiendo el gas contenido en la cámara al ascender el pistón. En la etapa de combustión, cuando llega al final de la carrera en la parte superior, la presión del gas es máxima, dando paso a la inflamación de la mezcla provocada por la chispa en la bujía. Una vez ha iniciado la combustión se obtiene un incremento de temperaturas y la presión dentro del cilindro, finalizando con la única etapa en la que se obtiene trabajo. En la última fase los gases son empujados por el pistón a través de la válvula de escape, y reiniciando el ciclo (Díaz, *et al.*, 2017).

2.7. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

Según Bolaños (2005), el hidrógeno puede ser almacenado de varias formas, entre las cuales se encuentran:

- Gas comprimido
- Líquido
- Hidruros Metálicos
- Hidruro químico
- Nanoestructuras de carbono.

El mismo autor menciona que, de todas las formas de almacenamiento mencionadas anteriormente, el hidrógeno líquido es el que posee mayor intensidad de energía.

De acuerdo a Flores (2016), por motivos de seguridad y para evitar el aumento de presión, se debe permitir la purga del gas de hidrógeno, de manera que el hidrógeno líquido no constituye una solución viable para el almacenamiento a largo plazo en aplicaciones móviles.

Según López (2018), la cantidad máxima de almacenamiento de hidrógeno por unidad de volumen o de masa depende generalmente de las siguientes condiciones:

- La rapidez de las reacciones de captura (hidruración) y liberación (deshidruración) del hidrógeno.
- Las temperaturas y presiones requeridas para la captura y liberación del hidrógeno.
- La vida útil (duración) del medio de almacenamiento.
- La disponibilidad y costo de los materiales y de las tecnologías de producción.

2.8. MOTOR DE CUATRO TIEMPOS

Según Martínez (2007), el motor de cuatro tiempos se lo denomina así por realizarse cuatro ciclos distintos dentro del motor al momento de combustionar la gasolina. A continuación, se explican los procesos que se realizan en el motor en cada ciclo o tiempo:

- **1er tiempo: Admisión.** - En el momento que el pistón está en el punto más alto (PMS), la válvula de admisión se abre y el propio pistón por el vacío que se crea dentro del cilindro aspira la mezcla (aire y combustible) hasta llegar al punto más bajo del cilindro (PMI).
- **2do tiempo: Compresión:** Después del ciclo de admisión, el pistón se encuentra en el punto más bajo (PMI), en este momento la válvula de admisión se cierra y el pistón empieza a ascender comprimiendo la mezcla hasta llegar al punto más alto del cilindro (PMS).
- **3er tiempo: Expansión:** Una vez que en la carrera de compresión se ha comprimido la mezcla, la bujía hace saltar una chispa y enciende la mezcla, aumentando la presión en el cilindro y haciendo descender el

pistón hacia el punto más bajo (PMI). En esta carrera de expansión es donde se realiza el trabajo útil.

- **4to tiempo: Escape de gases:** Cuando el pistón llega al punto más bajo (PMI), se abre la válvula de escape y el pistón empieza a ascender empujando los gases quemados hacia el exterior. En el momento que llega al punto más alto (PMS) la válvula de escape se cierra.

Según Godoy (2011), existen diferentes consumos de combustible en motores de cuatro tiempos.

2.8.1. Características del Motor

- Modelo: Lt 210 (motor estacionario).
- Sistema de arranque: Arranque manual.
- Tipo de admisión: Carburador.
- Capacidad de aire 0,6 l.
- Peso neto: 25,5 kg.
- Dimensiones: 590 mm x 433 mm x 508 mm.
- Potencia: 5.5 hp

CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO

3.1. UBICACIÓN

El presente proyecto se llevó a cabo en la Carrera de ingeniería Ambiental de la ESPAM “MFL”, situada en el sitio El Limón, parroquia Calceta, cantón Bolívar, provincia de Manabí. La ubicación geográfica de la ESPAM “MFL” se presenta en las coordenadas $00^{\circ}49'23''$ de latitud sur y $80^{\circ}11'01''$ de longitud oeste, con una altitud de 15msnm.



Figura 3. 1. Carrera de Ingeniería Ambiental “ESPAM MFL”

3.2. DURACIÓN DEL TRABAJO

La investigación tuvo una duración de 8 meses: desde el mes de julio de 2018 hasta marzo de 2019.

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación fue de tipo experimental.

3.4. MÉTODOS, TÉCNICAS

3.4.1. MÉTODOS

- **Inductivo:** Según Sierra (2012) el método inductivo es un proceso que parte del estudio de casos particulares para llegar a conclusiones o leyes universales que explican un fenómeno. Es por ello que en esta investigación se empleó el método inductivo para el despliegue de conceptos y definiciones que permitieron extraer resultados y pautas de los distintos análisis que se realizaron.

3.4.2. TÉCNICAS

- **Observación:** Esta técnica fue utilizada con la finalidad de verificar el rendimiento del motor usando dos tipos de combustibles (gasolina, hidrógeno); para su efecto se establecieron varios modelos de práctica.

3.5. VARIABLES DE ESTUDIO

3.5.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Tipos de combustibles – hidrógeno y gasolina.

3.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Rendimiento del motor.

3.6. PROCEDIMIENTOS

3.6.1. FASE I. IMPLEMENTAR GENERADORES QUE PERMITAN PRODUCIR LA CONCENTRACIÓN NECESARIA DE HIDRÓGENO PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

ACTIVIDAD 1.1. Determinación de la concentración necesaria de hidrógeno para el funcionamiento del motor

Para determinar la concentración de hidrógeno necesario para el funcionamiento del motor, se procedió a la revisión de varias bibliografías en donde muestre una concentración de hidrógeno óptimo para el desarrollo de trabajo investigativo.

Las consideraciones que se tomaron en cuenta para la búsqueda de información fueron las siguientes: hidrógeno producido sin mezcla de ningún combustible fósil, hidrógeno producido por el proceso de hidrólisis e hidrógeno producido para el funcionamiento del motor de cuatro tiempos.

ACTIVIDAD 1.2. Determinación de los parámetros de diseño de un generador para la producción del hidrógeno necesario:

Para la producción óptima de concentración de hidrógeno, fue necesaria la implementación de un sistema de generación de hidrógeno, que, mediante la electrólisis, pudo separar el hidrógeno del agua. El sistema constó de generadores suficientes para alcanzar la demanda de concentración de hidrógeno para que un motor pueda funcionar.

En la construcción de un generador, lo más importante son los electrolitos y los electrodos. También es necesario el uso de placas que posean canales de flujo que permitan distribuir el fluido de forma homogénea y segura por toda el área de la celda (The Fuel Cell, 2007).

Para la construcción se utilizó el diseño propuesto por Quezada y Torres (2014), los cuales recomiendan un generador de celda seca el cual, teóricamente, produce la cantidad de hidrógeno necesario para el funcionamiento de un motor de cuatro tiempos. El generador propuesto fue pequeño y ergonómico, en donde las piezas a considerar para su construcción son las siguientes:

- **Piezas de madera:** Las piezas de madera se ubican en los extremos del generador, tienen dimensiones de 26 cm x 16 cm con un espesor de 2 cm. Cada plancha presenta 18 agujeros de 0,6 cm que servirán para insertar los pernos que ayudan a ajustar los electrodos y las juntas de caucho, consiguiendo así la correcta hermeticidad del equipo. También presentan agujeros de 0,9 cm que servirán para la entrada del líquido y la salida del gas
- **Piezas de aluminio (electrodos positivos y negativos):** Los electrodos son de material conductor, el adecuado en su utilización es el platino, pero debido a su alto precio en el mercado es difícil de obtener. El aluminio, por su bajo costo y propiedades conductoras fue el material que se utilizó para la fabricación de los electrodos. A través de los electrodos se conectó la corriente eléctrica que pasa por el sistema y permite la electrólisis. Las dimensiones de los electrodos tuvieron medidas de 13 cm x 23 cm, con un espesor de 0,75 mm; separados por piezas de caucho para evitar un corto circuito en el generador; poseen agujeros de 0,9 cm por los que transitó el líquido y el hidrógeno producido; 18 agujeros de 0,6 cm por los que pasaron los pernos de ajuste del sistema.
- **Piezas de aluminio (electrodos neutros):** Constaron de nueve piezas de 13 cm x 18 cm. Fueron piezas más pequeñas que los electrodos positivos y negativos y se colocaron entre las piezas de caucho y los electrodos que transmitieron la corriente.
- **Piezas de caucho:** Constituyeron 12 láminas delgadas de 0,2 cm de espesor, su función es evitar el contacto entre los electrodos que puede generar corto circuito en el sistema. El tamaño de las láminas fueron de 13 cm x 18 cm; se realizaron 18 agujeros por donde se insertaron los pernos de ajuste del generador. La parte central de la lámina fue cortada para el correcto flujo del líquido y el hidrógeno obtenido.

El Cuadro 3.1. presenta los materiales que fueron necesarios en la construcción de un generador de hidrógeno.

Cuadro 3. 1. Materiales para el diseño de un generador.

| Materiales | Número de piezas para un generador |
|---------------------------------|---|
| Piezas de Madera | 2 |
| Piezas de aluminio (Electrodos) | 11 (9 neutrales, 1 negativo, 1 positivo) |
| Piezas de caucho | 12 |
| Pernos | 18 |
| Tuercas | 36 |
| Cable de Corriente #12 | 3 |

Fuente: Quezada y Torres (2014).

ACTIVIDAD 1.3. Construcción del generador de hidrógeno:

La construcción se realizó con el diseño previamente propuesto por Quezada y Torres (2014), siguiendo el siguiente procedimiento:

- Se cortaron las planchas de madera en dimensiones de 26 cm x 16 cm y mediante un taladro se perforaron los agujeros de 0,6 cm y 0,9 cm.
- Con la ayuda de una sierra eléctrica, se cortaron las piezas de acero inoxidable que sirvieron como electrodos, y, mediante un taladro, se realizaron los agujeros de 0,6 cm y 0,9 cm.
- Las juntas de caucho se cortaron en 13 cm x 18 cm, y mediante un taladro se hicieron 18 agujeros de 0,6 cm para que pasen los pernos de acero.
- Las planchas de madera se ubicaron en los extremos del sistema; entre las piezas de madera se instalaron las piezas de acero con las juntas de caucho, con la finalidad de separar cada electrodo con las piezas de caucho y evitar un corto circuito en el sistema. Luego, se insertaron los dieciocho pernos para dar soporte en el generador. Finalmente, se le adaptaron las salidas y entradas en los agujeros de 0,9 cm en las planchas de madera para que entre el líquido y salga el gas hidrógeno obtenido.

El sistema se ajustó perfectamente para evitar la fuga de agua o del gas hidrógeno producido.

ACTIVIDAD 1.4. Análisis de la cantidad de hidrógeno producido en el generador para distintos tipos de electrolitos:

Para mejorar la producción de hidrógeno mediante el proceso de electrólisis, fue necesario el uso de electrolitos que ayuden a optimizar la concentración de hidrógeno necesario para el funcionamiento del motor de cuatro tiempos. Según Quezada y Torres (2014), los electrolitos recomendados para mejorar la producción de hidrógeno son: cloruro de sodio, bicarbonato de sodio, hidróxido de sodio e hidróxido de potasio. Del mismo modo, los autores previamente mencionados describen que las cantidades de cada electrolito no debe sobrepasar los 0,10 kg por cada prueba. Por este motivo, se consideraron cantidades de 0,05 kg y 0,10 kg en el análisis de la cantidad de hidrógeno producido por el generador.

Según Rivera (2015), en 60 s se puede obtener un valor de 21.936 ppm de hidrógeno por un litro de agua con una corriente de 8 A. Sin embargo, Holgado (2012) menciona que la producción de hidrógeno es directamente proporcional a la corriente consumida, esto quiere decir que, a mayor corriente empleada en el generador mayor será la cantidad de hidrógeno obtenido. Por ese motivo, se consideraron diferentes cantidades de corriente (6 A, 8 A, 10 A) para las pruebas correspondientes de producción de hidrógeno. De ese modo se pudo comprobar la corriente para obtener la concentración máxima de hidrógeno.

Según Aguilar y Cuvi (2016), el tiempo adecuado para que un generador de hidrógeno tenga su máximo rendimiento debe ser de 5 minutos (300 s). Además, Rivera (2015) menciona que se necesita un intervalo de 60 s para la obtención adecuada de hidrógeno como combustible. Por ese motivo, se consideraron tres intervalos diferentes de tiempo para analizar la concentración de hidrógeno obtenido: 60 s, 120 s y 300 s.

Con las consideraciones mencionadas previamente, se diseñaron seis pruebas por cada electrolito, cada prueba con tres tratamientos distintos, setenta y dos tratamientos en total por los cuatro electrolitos.

Para la ejecución de las pruebas del generador se consideró lo siguiente:

- Un litro de agua.
- Voltaje de 12 V.
- Dos cantidades distintas de electrolito, 0,05 kg y 0,10 kg respectivamente.

Esto con el fin de determinar si la cantidad de electrolito influye de manera considerable en la obtención de hidrógeno. Cada cantidad de electrolito fue mezclada con 250 ml de agua destilada que posteriormente se colocó en el litro de agua del cual se obtuvo el hidrógeno.

- En cada cantidad de electrolito (0,05 kg, 0,10 kg) se hicieron tres tratamientos (6 en total por cada electrolito). Cada una con amperajes distintos de 6 A, 8 A y 10 A, en tiempos de 60 s, 120 s y 300 s respectivamente. Esto con el fin de reconocer la corriente y el tiempo adecuado para la generación óptima de hidrógeno.

En cada una de las pruebas de cada electrolito se utilizó el sensor MQ-8, es un sensor sensible al hidrógeno el cual mostró las concentraciones máximas en partes por millón (ppm). Para cada prueba, el sensor se colocó en la salida del generador para que pueda medir de forma directa la cantidad de hidrógeno producido (Quezada y Torres, 2014).

Posteriormente, se comparó la cantidad de hidrógeno producido con la concentración sugerida por diferentes autores. Quezada y Torres (2014) mencionan que la concentración adecuada de hidrógeno para que un motor funcione correctamente debe ser de 21.000 ppm aproximadamente, mientras que Rivera (2015) menciona que debe ser 21.936 ppm.

ACTIVIDAD 1.5. Instalación del sistema de generación de hidrógeno en el motor:

Una vez obtenida la concentración necesaria de hidrógeno para el funcionamiento de motor, se procedió a la instalación del sistema de generación de hidrógeno en el motor.

Para la instalación del sistema de generación de hidrógeno se utilizó las siguientes herramientas:

- a) Taladro
- b) Soldadura
- c) Guantes de goma
- d) Mandil
- e) Alicates
- f) Pinzas
- g) Multímetro

Posteriormente, se fijó en serie los generadores para obtener una mayor concentración de hidrógeno. La fijación se realizó con abrazaderas de $\frac{1}{2}$ pulgada para evitar fugas de líquido o de hidrógeno. La instalación eléctrica se la realizó en paralelo desde una batería de 12 V hacia los tres generadores; el cable que se utilizó para el paso de electricidad desde la batería hasta los generadores de hidrógeno, fue el cable trifásico grueso N° 12, ya que es el adecuado para este tipo de instalaciones. La batería se conectó en paralelo con cada generador para que el sistema no pierda potencia. Los generadores se ubicaron 10 cm por debajo del agua que fue electrolizada. Esto con el fin de que la gravedad facilite el ingreso del líquido (Quezada y Torres, 2014).

Finalmente, se adaptó la salida del sistema de generación de hidrógeno en la entrada de aire del motor para que ingrese directamente al pistón, ya que, esa es la manera adecuada para que el motor funcione con hidrógeno (Orozco, 2014).

3.6.2. FASE II. COMPARAR EL RENDIMIENTO DEL MOTOR USANDO HIDRÓGENO Y GASOLINA COMO COMBUSTIBLES

Para comparar el rendimiento del motor usando hidrógeno y gasolina, se analizaron parámetros de temperatura, ruido y consumo de cada combustible.

ACTIVIDAD 1.6. Medición de la temperatura

Dentro de esta actividad, se procedió a la medición de la temperatura del motor alimentado con hidrógeno y después con gasolina para su respectiva comparación. La medición se realizó con el termómetro infrarrojo GM320 (Anexo 12), el cual tiene una variación de precisión del 1,5 %, y un rango de medición

de temperatura entre -50°C a 380°C . Las pruebas se realizaron en tiempos de 60 s, 120 s, 180 s, 240 s y 300 s; el lugar donde se apuntó el termómetro fue en el “bloque” del motor, ya que es allí el lugar donde sucede la combustión del combustible.

Se consideraron pausas mínimas de 6 horas entre cada análisis de combustible, ya que fue necesario tener el motor frío para obtener un resultado adecuado de temperatura para cada combustible.

Los motores de combustión tienen un límite máximo de temperatura de 100°C para su operación, de sobrepasar este nivel se tienen problemas de lubricación por disminución de la viscosidad del aceite, también se pueden tener problemas de deformación de algunas piezas del motor. Entre las causas que generan una elevada temperatura en un motor de combustión interna se tienen: obstrucción de los orificios de circulación de aire en el radiador, falla en la bomba del agua, falta de refrigerante en el motor ruptura de la correa del ventilador del radiador, fugas de agua en el radiador, entre otras (Fernández y Duarte, 2013).

ACTIVIDAD 1.7. Medición de ruido

Para la medición de ruido del motor usando gasolina e hidrógeno como combustibles, se utilizó el sonómetro Sper scientific IEC 61672 -1 Class 2 (Anexo 11). El sonómetro se calibró en “configuración A”, ya que esa es la configuración adecuada para que las longitudes de onda producidas por el motor sean captadas adecuadamente por el micrófono del sonómetro. De acuerdo a Juca (2013), las mediciones de sonido deben efectuarse a una distancia mínima de 0,25 m y deben ser realizadas en el escape del motor.

Según Zambrano y Mendoza (2017), el sonómetro se debe colocar apuntando hacia la fuente (escape del motor) en un ángulo de 45° . Los autores mencionan que el motor debe estar funcionando por 5 minutos antes de efectuar las pruebas de ruido. Al cabo de dicho período, en esta investigación se analizó el ruido del motor en tiempos de 60 s, 120 s, 180 s, 240 s y 300 s para cada combustible.

ACTIVIDAD 1.8. Cálculo del consumo de combustible

Dentro de esta actividad, se procedió al cálculo del consumo de combustible del motor alimentado con gasolina y después con hidrógeno para su respectiva comparación. Existen múltiples alternativas que permiten calcular el consumo de un combustible. La alternativa para calcular el consumo en un motor de cuatro tiempos estacionarios es el uso de un medidor de flujo (Aguilar y Cuvi, 2016). El medidor de flujo ayudó a calcular la cantidad de combustible consumido en litros por minuto. Sin embargo, fue necesario el uso de dos medidores de flujo, un medidor para analizar el consumo de gasolina por presentarse en estado líquido, y un medidor de flujo para analizar el consumo de hidrógeno por presentarse en forma de gas.

Para medir el consumo de gasolina se utilizó el medidor de flujo marca ZJ-LCD-M. El medidor se conectó entre la salida del tanque de gasolina y la entrada de combustible del motor, se evaluó el consumo en tiempos de 60 s, 120 s, 180 s, 240 s y 300 s. Del mismo modo, para medir el consumo de hidrógeno se utilizó el equipo Gas Alert Max XTII (Anexo 13); la función principal del equipo es medir las concentraciones de gases presentes en el ambiente, sin embargo, tiene la capacidad de medir el flujo de gas consumido por un motor en l/min. El medidor de consumo de hidrógeno se conectó entre la salida del sistema de generación de hidrógeno y la entrada del combustible del motor.

Posteriormente se procedió a analizar el consumo de cada combustible, considerando analizar primero la gasolina y luego el hidrógeno para que no exista ningún tipo de mezcla de combustibles, y así poder obtener un resultado óptimo para cada uno de ellos.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. IMPLEMENTAR GENERADORES QUE PERMITAN PRODUCIR LA CONCENTRACIÓN NECESARIA DE HIDRÓGENO PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

4.1.1. Determinación de la concentración necesaria de hidrógeno para el funcionamiento del motor

Existieron diversas fuentes bibliográficas que mostraron diferentes valores de concentración de hidrógeno para que un motor funcione, sin embargo, las cantidades de hidrógeno variaban considerablemente entre cada autor. No obstante, existieron dos investigaciones que tenían concordancia entre ellas. Las investigaciones consideradas en esta investigación fueron de Rivera (2015) y Quezada y Torres (2014). Los mencionados autores propusieron que la concentración de hidrógeno necesario para que un motor de cuatro tiempos funcione debe ser de 21.936 ppm y 21.000 ppm correspondientemente.

Para poder obtener las concentraciones mencionadas previamente, cada autor propuso una metodología diferente. Sin embargo, la metodología utilizada por Rivera (2015) no se consideró factible en esta investigación debido al alto costo en la elaboración del generador de hidrógeno para que produzca los 21.936 ppm que ellos mencionan. Por ese motivo, se eligió la metodología de Quezada y Torres (2014) para usar la concentración necesaria de hidrógeno para que el motor funcione.

4.1.2. Determinación de los parámetros de diseño de un generador para la producción del hidrógeno necesario

Para determinar los parámetros de diseño de un generador de hidrógeno, fue necesario conocer el sistema adecuado que permita producir 21.000 ppm de concentración. Por ese motivo, se consideraron los parámetros de diseño que implementaron Quezada y Torres (2014). El diseño de las piezas que componen el generador se muestra a continuación:

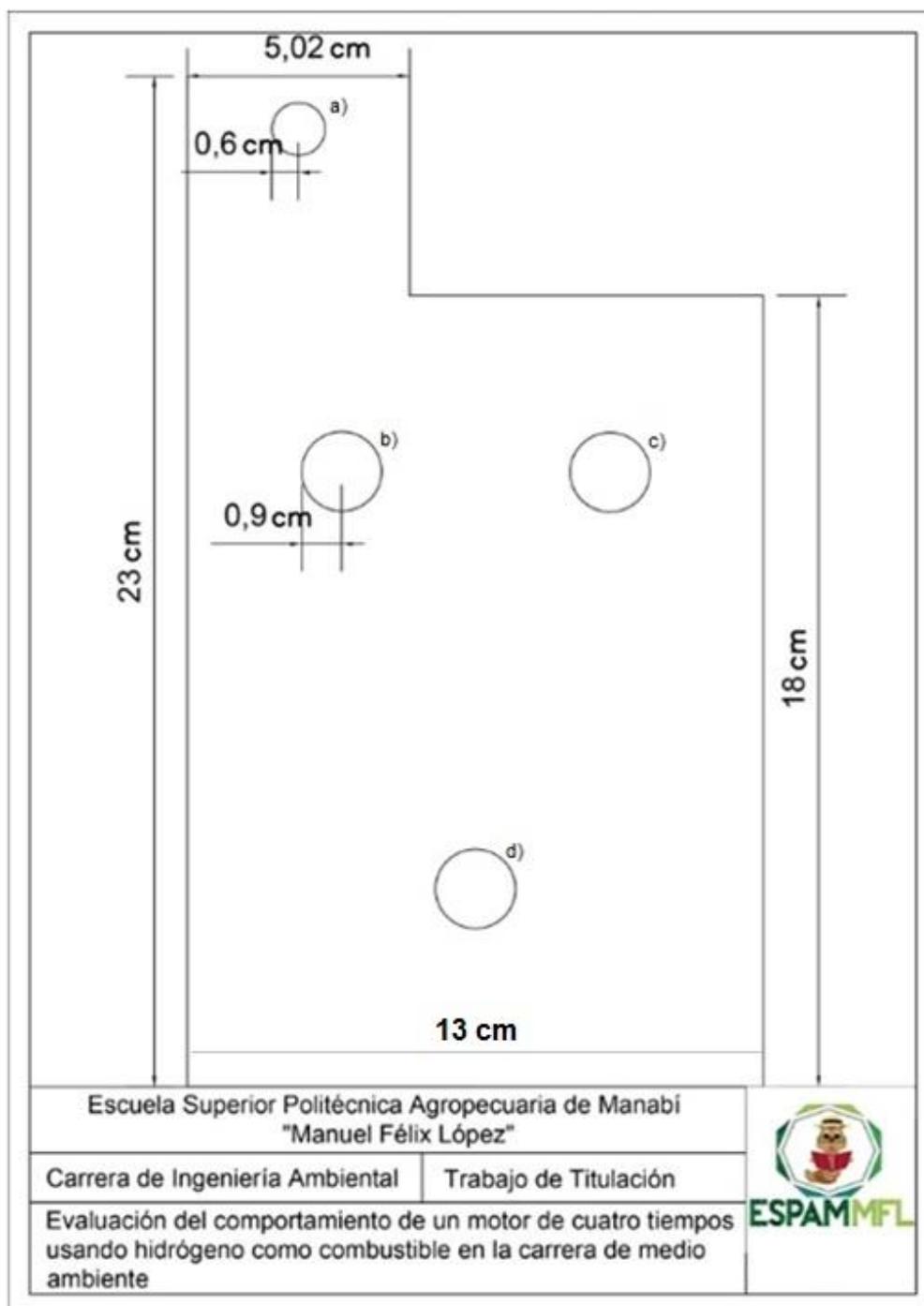


Figura 4. 1. Piezas de aluminio que sirven como electrodos.

Fuente: Ortiz y Pardo (2019).

La figura 4.1. presenta el diseño de las piezas más importantes del sistema, ya que por allí pasó la corriente eléctrica que el generador necesitó para realizar el proceso de electrólisis (Anexo 2 y 3). La función de cada agujero presente en el diseño, se describe a continuación:

- Agujero "a)": Orificio de 0,6 cm en donde se conecta la corriente eléctrica.

- Agujeros “b)” y “c)”: Orificios de 0,9 cm por donde fluye el hidrógeno producido.
- Agujero “d)”: orificio de 0,9 cm por donde pasó el agua del que se separó el hidrógeno.

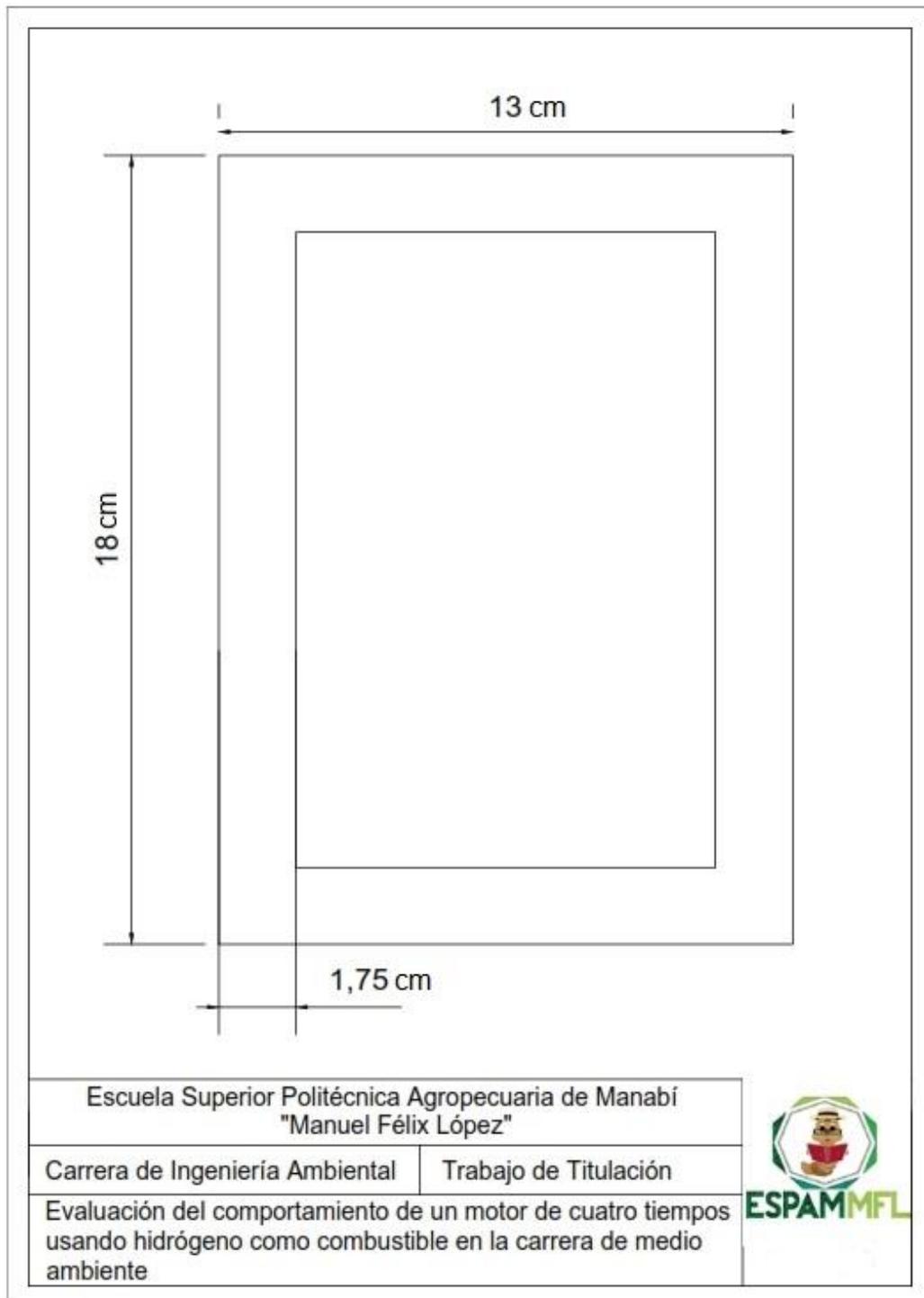


Figura 4.2. Piezas de caucho.
Fuente: Ortiz y Pardo (2019).

La figura 4.2 muestra el diseño de las piezas de caucho. Sirvieron de aislantes entre cada electrodo para evitar un posible cortocircuito del sistema (Anexo 4).

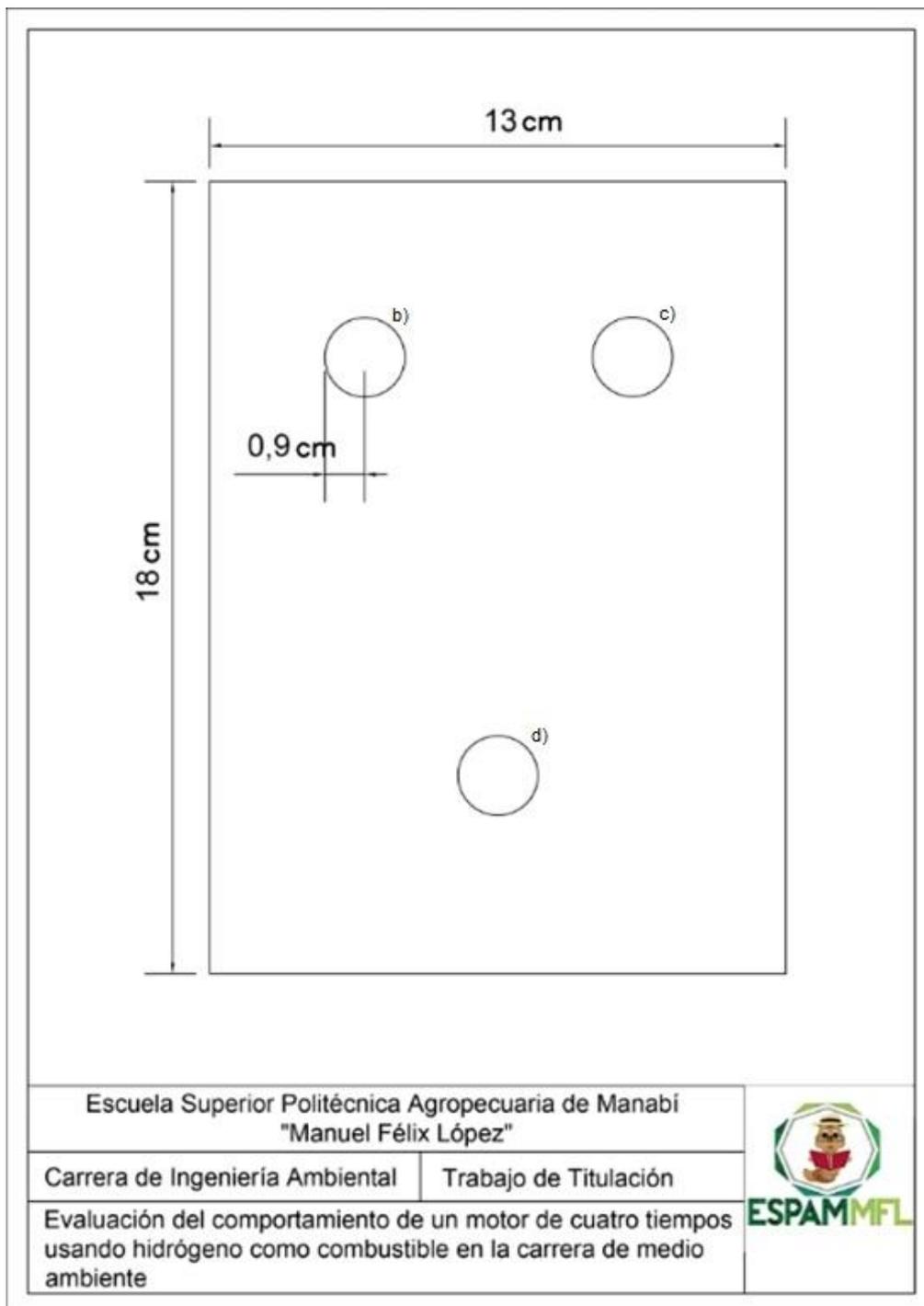


Figura 4. 3. Piezas de aluminio que sirven como electrodos neutrales.

Fuente: Ortiz y Pardo (2019).

La figura 4.3. muestra el diseño de los electrodos neutrales que ayudaron en el proceso de electrólisis. Pese a que los electrodos negativos no se conectaron a la corriente eléctrica directamente, sí pasó electricidad proveniente de los

electrolitos. Esta corriente ayudó a liberar con mayor eficiencia el hidrógeno (Anexo 2). Los agujeros “b” y “c” ayudaron a transmitir el flujo de hidrógeno, mientras que el agujero “d”, ayudó a fluir el agua del cual se extrajo el hidrógeno.

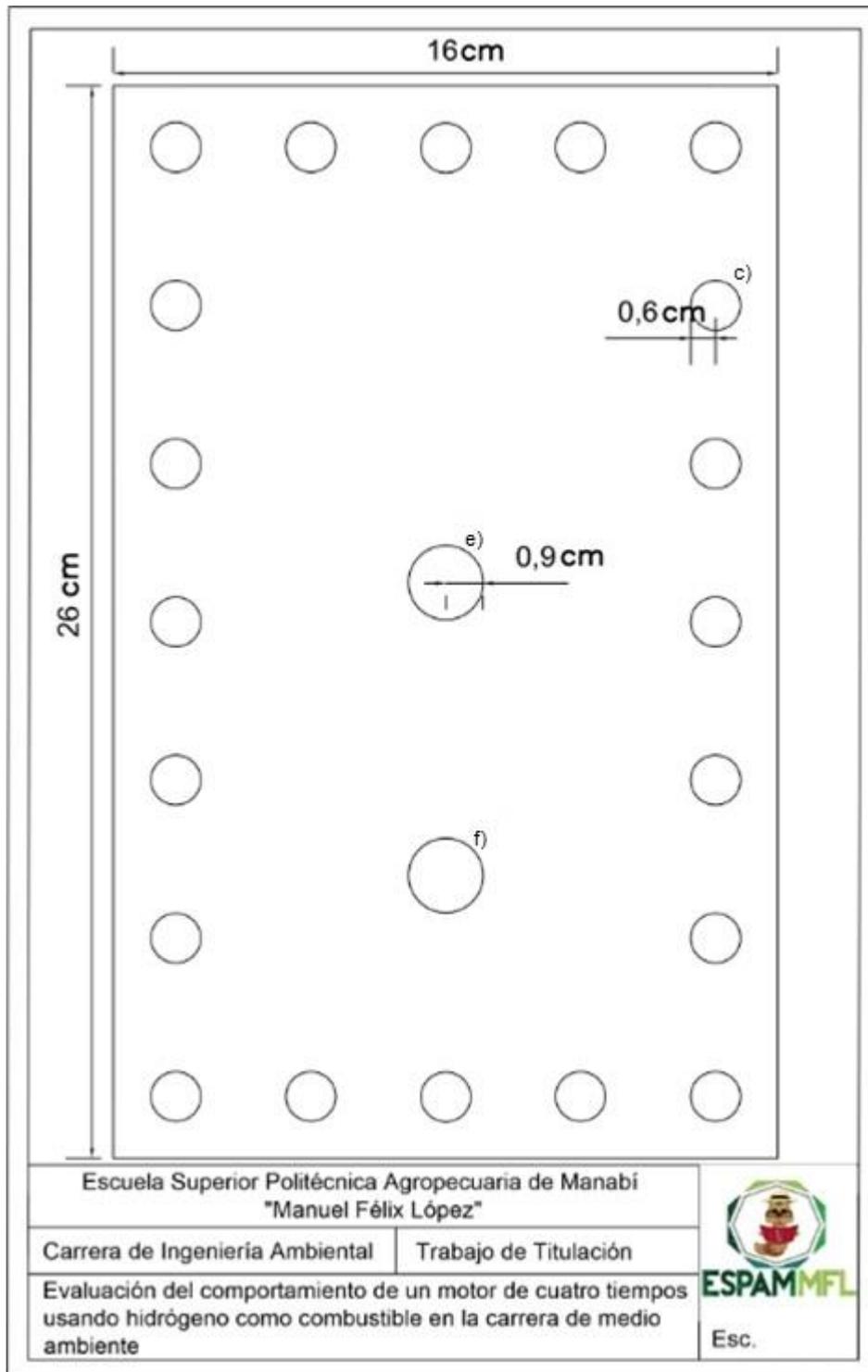


Figura 4. 4. Piezas de madera.

Fuente: (Ortiz y Pardo, 2019).

La Figura 4.4. muestra el diseño de las piezas de madera las cuales fueron las piezas externas del generador. Aquí se colocaron los pernos (agujeros de 0,6 cm) que ayudaron a fijar el sistema para prevenir algún tipo de fuga (sea líquido o gas). (Anexo 5). Asimismo, en la parte central se perforaron dos agujeros “f” y “e” que sirvieron de entrada del agua y salida del hidrógeno respectivamente

4.1.3. Construcción del generador de hidrógeno

Para la construcción del generador de hidrógeno se consideró la metodología de Quezada y Torres (2014) expuestos en la actividad 1.3.

Hay que recalcar que es muy importante el ajuste de las piezas que componen el generador, de este modo se previene fugas de agua y de hidrógeno.

La construcción final del generador se observa en el Anexo 6.

4.1.4. Análisis de la cantidad de hidrógeno producido en el generador para distintos tipos de electrolitos:

Para los análisis de producción de hidrógeno se utilizaron cuatro electrolitos diferentes, los cuales fueron: cloruro de sodio, bicarbonato de sodio, hidróxido de sodio e hidróxido de potasio. Cada electrolito fue evaluado en diferentes cantidades, diferente tiempo y diferente corriente en el sistema de generación de hidrógeno.

Los tiempos considerados para el análisis fueron de 60 s, 120 s y 300 s, debido a que en 60 s es el tiempo mínimo en el que se puede obtener la concentración de hidrógeno adecuado para que el motor funcione (21.936 ppm) (Rivera, 2015) y 300 s el tiempo adecuado para que un generador de hidrógeno tenga su máximo rendimiento (Aguilar y Cuvi, 2016). Las cantidades de cada electrolito para las pruebas fueron de 0,05 kg y 0,10 kg que fue lo sugerido por Quezada y Torres (2014). Asimismo, la corriente varió entre 6 A, 8 A y 10 A, con el fin de identificar el amperaje óptimo para la producción de hidrógeno (Anexos 7, 8 y 9).

En cada electrolito se realizaron seis pruebas de obtención de hidrógeno. Los resultados de cada prueba se muestran a continuación en los siguientes cuadros:

1) HIDRÓXIDO DE SODIO

- **Electrolito:** hidróxido de sodio y agua destilada.
- **Voltaje aplicado:** 12V.

Cuadro 4. 1. Pruebas del hidróxido de sodio para la generación de hidrógeno.

| Pruebas | Cantidad de electrolito | Cantidad de agua destilada | Tiempo | Corriente | Concentración mínima de Hidrógeno | Concentración máxima de Hidrógeno |
|---------|-------------------------|----------------------------|--------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0,05 kg | 250 ml | 60s | 6 A | 10 ppm | 321 ppm |
| | | | | 8 A | 11 ppm | 1234 ppm |
| | | | | 10 A | 10 ppm | 572 ppm |
| 2 | | | 120 s | 6 A | 11 ppm | 522 ppm |
| | | | | 8 A | 12 ppm | 1422 ppm |
| | | | | 10 A | 10 ppm | 874 ppm |
| 3 | 300 s | 6 A | 11 ppm | 921 ppm | | |
| | | 8 A | 12 ppm | 1783 ppm | | |
| | | 10 A | 10 ppm | 1074 ppm | | |
| 4 | 0,10 kg | 250 ml | 60 s | 6 A | 10 ppm | 533 ppm |
| | | | | 8 A | 13 ppm | 1396 ppm |
| | | | | 10 A | 11 ppm | 692 ppm |
| 5 | | | 120 s | 6 A | 11 ppm | 744 ppm |
| | | | | 8 A | 12 ppm | 1561 ppm |
| | | | | 10 A | 11 ppm | 990 ppm |
| 6 | 300 s | 6 A | 10 ppm | 1021 ppm | | |
| | | 8 A | 12 ppm | 1939 ppm | | |
| | | 10 A | 11 ppm | 1170 ppm | | |

Fuente: Ortiz y Pardo (2019)

El Cuadro 4.1. muestra las concentraciones de hidrógeno obtenidas en las distintas pruebas. Se pudo observar que la corriente de 8 A fue la que mejor resultado mostró. Esto demuestra lo dicho por Rivera (2015), el cual mencionaba que la corriente adecuada para que suceda la electrólisis de forma correcta en la generación de hidrógeno debe ser de 8 A. Los resultados muestran que el tiempo de 300 s (5 min), existió mayor concentración de hidrógeno, teniendo un valor máximo de 1939 ppm con 0,10 kg de electrolito. Esto explica lo dicho por Aguilar y Cuvi (2016), los cuales mencionaron que el tiempo adecuado para que un generador de hidrógeno tenga su máximo rendimiento debe ser de 5 minutos (300 s).

Del mismo modo, se observó que aumentando la cantidad de electrolito (0,10 kg) también aumenta la concentración de hidrógeno producido. Aunque el aumento de concentración de hidrógeno no sea significativo con relación al análisis de 0,05 kg de electrolito, se evidencia que sí cumple lo dicho por Quezada y Torres

(2014), los cuales mencionaron que aumentando el electrolito aumenta la producción de hidrógeno.

La concentración máxima obtenida de hidrógeno usando el hidróxido de sodio como electrolito fue de 1.939 ppm, en un tiempo de 300 s y con una corriente de 8 A, sin embargo, la cantidad obtenida no se acerca a la concentración propuesta por Quezada y Torres (2014) para el funcionamiento de un motor. La cantidad adecuada debe ser de 21.000 ppm de hidrógeno aproximadamente.

2) BICARBONATO DE SODIO

- **Electrolito:** bicarbonato de sodio y agua destilada
- **Voltaje aplicado:** 12V

Cuadro 4. 2. Pruebas del bicarbonato de sodio para la generación de hidrógeno.

| Pruebas | Cantidad de electrolito | Cantidad de agua destilada | Tiempo | Corriente | Concentración mínima de Hidrógeno | Concentración máxima de Hidrógeno |
|---------|-------------------------|----------------------------|--------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0,05 kg | 250 ml | 60s | 6 A | 10 ppm | 791 ppm |
| | | | | 8 A | 12 ppm | 1782 ppm |
| | | | | 10 A | 11 ppm | 1166 ppm |
| 2 | | | 120 s | 6 A | 11 ppm | 898 ppm |
| | | | | 8 A | 12 ppm | 2284 ppm |
| | | | | 10 A | 11 ppm | 1365 ppm |
| 3 | | | 300 s | 6 A | 11 ppm | 1197 ppm |
| | | | | 8 A | 13 ppm | 2886 ppm |
| | | | | 10 A | 11 ppm | 1665 ppm |
| 4 | 0,10 kg | 250 ml | 60 s | 6 A | 10 ppm | 990 ppm |
| | | | | 8 A | 12 ppm | 2236 ppm |
| | | | | 10 A | 11 ppm | 1274 ppm |
| 5 | | | 120 s | 6 A | 11 ppm | 1057 ppm |
| | | | | 8 A | 12 ppm | 2978 ppm |
| | | | | 10 A | 11 ppm | 2165 ppm |
| 6 | | | 300 s | 6 A | 11 ppm | 1255 ppm |
| | | | | 8 A | 13 ppm | 3277 ppm |
| | | | | 10 A | 10 ppm | 2470 ppm |

Fuente: Ortiz y Pardo (2019).

El Cuadro 4.2. muestra las concentraciones de hidrógeno obtenidas en las distintas pruebas. Se pudo observar que la corriente de corriente de 8 A fue la que mejor resultado mostró. Esto demuestra lo dicho por Rivera (2015), el cual mencionaba que la corriente adecuada para que suceda la electrólisis de forma correcta en la generación de hidrógeno debe ser de 8 A. Los resultados muestran que 300 s (5 min) es el tiempo donde existe mayor concentración de hidrógeno, teniendo un valor máximo de 3.277 ppm con una cantidad de 0,10 kg

de electrolito. Esto demuestra lo dicho por Aguilar y Cuvi (2016), los cuales mencionaron que el tiempo adecuado para que un generador de hidrógeno tenga su máximo rendimiento debe ser de 5 minutos (300 s).

Del mismo modo, se observó que aumentando la cantidad de electrolito (0,10 kg) también aumenta la concentración de hidrógeno producido. Aunque el aumento de concentración de hidrógeno no sea significativo con relación al análisis de 0,05 kg de electrolito, se evidencia que sí cumple lo dicho por Quezada y Torres (2014), los cuales mencionaron que aumentando el electrolito aumenta la producción de hidrógeno.

La concentración máxima obtenida de hidrógeno usando el bicarbonato de sodio como electrolito fue de 3.277 ppm, en un tiempo de 300 s y con una corriente de 8 A, sin embargo, la cantidad obtenida no se acerca a la concentración propuesta por Quezada y Torres (2014) para el funcionamiento de un motor.

3) HIDRÓXIDO DE POTASIO

- **Electrolito:** hidróxido de potasio y agua destilada
- **Voltaje aplicado:** 12V

Cuadro 4. 3. Pruebas del hidróxido de potasio para la generación de hidrógeno.

| Pruebas | Cantidad de electrolito | Cantidad de agua destilada | Tiempo | Corriente | Concentración mínima de Hidrógeno | Concentración máxima de Hidrógeno |
|---------|-------------------------|----------------------------|--------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0,05 kg | 250 ml | 60s | 6 A | 14 ppm | 2240 ppm |
| | | | | 8 A | 17 ppm | 4102 ppm |
| | | | | 10 A | 15 ppm | 3672 ppm |
| 2 | | | 120 s | 6 A | 14 ppm | 3253 ppm |
| | | | | 8 A | 16 ppm | 6807 ppm |
| | | | | 10 A | 15 ppm | 5215 ppm |
| 3 | | | 300 s | 6 A | 13 ppm | 3986 ppm |
| | | | | 8 A | 17 ppm | 8720 ppm |
| | | | | 10 A | 13 ppm | 6013 ppm |
| 4 | 0,10 kg | 250 ml | 60 s | 6 A | 14 ppm | 2982 ppm |
| | | | | 8 A | 15 ppm | 5302 ppm |
| | | | | 10 A | 15 ppm | 4177 ppm |
| 5 | | | 120 s | 6 A | 13 ppm | 5396 ppm |
| | | | | 8 A | 17 ppm | 7608 ppm |
| | | | | 10 A | 13 ppm | 6003 ppm |
| 6 | | | 300 s | 6 A | 14 ppm | 6210 ppm |
| | | | | 8 A | 15 ppm | 9302 ppm |
| | | | | 10 A | 15 ppm | 7344 ppm |

Fuente: Ortiz y Pardo (2019).

El Cuadro 4.3. muestra las concentraciones de hidrógeno obtenidas en las distintas pruebas. Se pudo observar que la corriente de corriente de 8 A fue la que mejor resultado mostró. Esto demuestra lo dicho por Rivera (2015), el cual mencionaba que la corriente adecuada para que suceda la electrólisis de forma correcta en la generación de hidrógeno debe ser de 8 A. Los resultados muestran que 300 s (5 min) es el tiempo donde existe mayor concentración de hidrógeno, con un valor máximo de 9.302 ppm con 0,10 kg de electrolito. Esto demuestra lo dicho por Aguilar y Cuvi (2016), los cuales mencionaron que el tiempo adecuado para que un generador de hidrógeno tenga su máximo rendimiento debe ser de 5 minutos (300 s).

Del mismo modo, se observó que aumentando la cantidad de electrolito (0,10 kg) también aumenta la concentración de hidrógeno producido. Aunque el aumento de concentración de hidrógeno no sea significativo con relación al análisis de 0,05 kg de electrolito, se evidencia que sí cumple lo dicho por Quezada y Torres (2014), los cuales mencionaron que aumentando el electrolito aumenta la producción de hidrógeno.

La concentración máxima obtenida de hidrógeno usando el hidróxido de potasio como electrolito fue de 9.302 ppm, en un tiempo de 300 s y con una corriente de 8 A, sin embargo, la cantidad obtenida no se acerca a la concentración propuesta por Quezada y Torres (2014) para el funcionamiento de un motor. La cantidad adecuada debe ser de 21.000 ppm de hidrógeno aproximadamente.

4) CLORURO DE SODIO

- **Electrolito:** sal (cloruro de sodio) y agua destilada.
- **Voltaje aplicado:** 12V

Cuadro 4. 4. Pruebas del cloruro de sodio para la generación de hidrógeno.

| Pruebas | Cantidad de electrolito | Cantidad de agua destilada | Tiempo | Corriente | Concentración mínima de Hidrógeno | Concentración máxima de Hidrógeno |
|---------|-------------------------|----------------------------|--------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0,05 kg | 250 ml | 60s | 6 A | 13 ppm | 2117 ppm |
| | | | | 8 A | 15 ppm | 3289 ppm |
| | | | | 10 A | 12 ppm | 2603 ppm |
| 2 | | | 120 s | 6 A | 13 ppm | 2879 ppm |
| | | | | 8 A | 14 ppm | 4690 ppm |
| | | | | 10 A | 13 ppm | 3388 ppm |
| 3 | | | 300 s | 6 A | 12 ppm | 3473 ppm |
| | | | | 8 A | 15 ppm | 5988 ppm |
| | | | | 10 A | 13 ppm | 3023 ppm |
| 4 | 0,10 kg | 250 ml | 60 s | 6 A | 15 ppm | 2910 ppm |
| | | | | 8 A | 17 ppm | 4297 ppm |
| | | | | 10 A | 13 ppm | 3371 ppm |
| 5 | | | 120 s | 6 A | 14 ppm | 2899 ppm |
| | | | | 8 A | 17 ppm | 5031 ppm |
| | | | | 10 A | 13 ppm | 3071 ppm |
| 6 | | | 300 s | 6 A | 15 ppm | 3900 ppm |
| | | | | 8 A | 17 ppm | 6797 ppm |
| | | | | 10 A | 14 ppm | 4346 ppm |

Fuente: Ortiz y Pardo (2019).

El Cuadro 4.4. muestra las concentraciones de hidrógeno obtenidas en las distintas pruebas. Se pudo observar que la corriente de corriente de 8 A fue la que mejor resultado mostró. Esto demuestra lo dicho por Rivera (2015), el cual mencionaba que la corriente adecuada para que suceda la electrólisis de forma correcta en la generación de hidrógeno debe ser de 8 A.

Los resultados mostraron que 300 s (5 min) es el tiempo donde existe mayor concentración de hidrógeno, teniendo un valor máximo de 6.797 ppm con una cantidad de 0,10 kg de electrolito. Esto demuestra lo dicho por Aguilar y Cuvi (2016), los cuales mencionaron que el tiempo adecuado para que un generador de hidrógeno tenga su máximo rendimiento debe ser de 5 minutos (300 s).

Del mismo modo, se observó que aumentando la cantidad de electrolito (0,10 kg) también aumenta la concentración de hidrógeno producido. Aunque el aumento de concentración de hidrógeno no sea significativo con relación al análisis de 0,05 kg de electrolito, se evidencia que sí cumple lo dicho por Quezada y Torres

(2014), los cuales mencionaron que aumentando el electrolito aumenta la producción de hidrógeno.

La concentración máxima obtenida de hidrógeno usando el hidróxido de potasio como electrolito fue de 6.797 ppm, en un tiempo de 300 s y con una corriente de 8 A, sin embargo, la cantidad obtenida no se acerca a la concentración propuesta por Quezada y Torres (2014) para el funcionamiento de un motor. La cantidad adecuada debe ser de 21.000 ppm de hidrógeno aproximadamente.

En las pruebas realizadas anteriormente para cada electrolito, se obtuvieron diferentes concentraciones de hidrógeno. Se observó que la cantidad de concentración de hidrógeno obtenido en corrientes de 6 A y 10 A son bajas en relación con el hidrógeno obtenido a una corriente de 8 A. Del mismo modo, se observó que en 300 s se obtuvo la máxima concentración de hidrógeno en cantidades de 0,10 kg de electrolito. En el Cuadro 4.5. se resumen las concentraciones máximas obtenidas por cada electrolito en el análisis de producción de hidrógeno:

Cuadro 4. 5. Concentraciones máximas de hidrógeno obtenido por cada electrolito.

| Electrolito | Cantidad de electrolito | Tiempo | Corriente | Concentración máxima de Hidrógeno |
|----------------------|-------------------------|--------|-----------|-----------------------------------|
| Hidróxido de Sodio | 0,10 kg | 300 s | 8 A | 1.939 ppm |
| Bicarbonato de Sodio | | | | 3.277 ppm |
| Hidróxido de Potasio | | | | 9.302 ppm |
| Cloruro de Sodio | | | | 6.797 ppm |

Fuente: Ortiz y Pardo (2019).

En el Cuadro 4.5. se observa que la corriente óptima para la máxima producción de hidrógeno fue de 8 A. Esto demuestra lo dicho por Rivera (2015), el cual menciona que la corriente adecuada para que suceda la electrólisis de forma correcta en la generación de hidrógeno debe ser de 8 A. Del mismo modo, los análisis demostraron lo dicho por Quezada y Torres (2014), los cuales mencionaron que al aumentar el electrolito aumenta la cantidad de concentración de hidrógeno. Además, los resultados de los análisis demostraron que 300 s son necesarios para la máxima producción de hidrógeno. Según Aguilar y Cuvi (2016), son cinco minutos (300 s) los necesarios para que el generador de hidrógeno tenga su máximo nivel de concentración de hidrógeno.

Asimismo, en el Cuadro 4.5. se observa que el hidróxido de potasio fue el electrolito más eficiente en la producción de hidrógeno. La concentración

máxima que se obtuvo fue de 9.302 ppm de hidrógeno. Sin embargo, la cantidad no alcanzó los 21.000 ppm necesarios propuestos por Quezada y Torres (2014). Eso sucedió por los materiales utilizados como electrodos. Los autores del diseño mencionaron que el material adecuado para los electrodos debe ser de acero inoxidable, níquel u oro, sin embargo, por su elevado costo y falta de disponibilidad se optó por usar el aluminio como material para los electrodos. Por ese motivo, los autores de esta investigación consideraron construir más generadores de hidrógeno para obtener la cantidad necesaria de hidrógeno para el funcionamiento del motor de cuatro tiempos.

Según Quezada y Torres (2014), un solo generador es suficiente para alcanzar los 21.000 ppm de hidrógeno, sin embargo, la concentración de hidrógeno obtenido en los análisis previos no satisfizo la demanda necesaria de hidrógeno. La máxima concentración obtenida fue de 9.302 ppm. Por ese motivo, se decidió construir dos generadores más para que pueda mejorar la eficiencia del proceso de electrólisis del agua.

Para las pruebas del sistema de tres generadores de hidrógeno, se conectaron las entradas del agua de cada generador en serie, las salidas del gas también se conectaron en serie y la batería de 12 V en paralelo. Esto con el fin de que no pierda eficiencia (Anexo 10).

Se realizaron seis pruebas en total, considerando el hidróxido de potasio como electrolito y 8 A como corriente, ya que esos dos valores fueron los que más eficiencia mostraron en las pruebas previas.

Las consideraciones para realizar las pruebas con tres generadores fueron las siguientes:

- Un litro de agua.
- Voltaje de 12 V.
- Dos cantidades distintas de hidróxido de potasio, 0,05 kg y 0,10 kg respectivamente. Cada cantidad se evaluaron en tiempos de 60 s, 120 s y 300 s.

En el Cuadro 4.6. se observan las seis pruebas realizadas por los tres generadores conectados:

Cuadro 4. 6. Cantidad de Hidrógeno producido por tres generadores de hidrógeno

| Pruebas | Cantidad de electrolito | Cantidad de agua destilada | Tiempo | Corriente | Concentración de H |
|---------|-------------------------|----------------------------|--------|-----------|--------------------|
| 1 | 0,05 kg | 250 ml | 60 s | 8 A | 21062 ppm |
| 2 | 0,05 kg | 250 ml | 120 s | 8 A | 24036 ppm |
| 3 | 0,05 kg | 250 ml | 300 s | 8 A | 23557 ppm |
| 4 | 0,10 kg | 250 ml | 60 s | 8 A | 23121 ppm |
| 5 | 0,10 kg | 250 ml | 120 s | 8 A | 24929 ppm |
| 6 | 0,10 kg | 250 ml | 300 s | 8 A | 26557 ppm |

Fuente: Ortiz y Pardo (2019).

En el cuadro 4.6 se observan las concentraciones de hidrógeno producidas por tres generadores. Se observa que la máxima concentración de hidrógeno generado fue de 26.557 ppm, en un tiempo de 300 s, con una corriente de 8 A con 0,10 kg de hidróxido de potasio; la concentración mínima fue de 21.062 ppm, en un tiempo de 60 s, con una corriente de 8 A con 0,5 kg de hidróxido de potasio como electrolito. Las cantidades de concentración de hidrógeno satisficieron lo dicho por Quezada y Torres (2014) que mencionaron que se aproximadamente se necesita de 21.000 ppm de hidrógeno para que un motor funcione. Del mismo modo se pudo comprobar lo dicho por Aguilar y Cuvi (2016), que mencionó que se necesita de 5 min (300 s) para que la eficiencia de la generación de hidrógeno sea la adecuada.

El sensor MQ-8 mostró que, pasado 60 s, la concentración de hidrógeno bajaba considerablemente. Esto quiere decir que, la concentración máxima de hidrógeno que genera un litro de gasolina para que funcione un motor es eficiente durante 60 s (1 min). Para que haya mayor tiempo de producción de hidrógeno, debe existir mayor cantidad de agua (Rivera y López, 2015).

Cabe mencionar que se utilizó aproximadamente 5 litros de agua, para realizar los análisis de 300 s del sistema de generación de hidrógeno.

4.1.5. Instalación del sistema de generación de hidrógeno en el motor

Previo a la instalación del sistema de generación de hidrógeno en motor, fue necesario especificar las partes técnicas del motor en donde se realizaron las pruebas. Las características del motor se muestran a continuación:

Cuadro 4.7. Características del motor.

| | |
|----------------------------|-----------------|
| Modelo | Lt210 |
| Combustible | Gasolina |
| Sistema de arranque | Arranque manual |
| Tipo de admisión | Carburador |
| Capacidad de aceite | 0,6 (L) |
| Peso neto | 25,5 (kg) |
| Dimensiones | 590*433*508(mm) |
| Potencia | 5.5 HP o 100 CV |

Fuente: Ortiz y Pardo (2019).

La salida del sistema de generadores se lo conectó a la entrada de aire del motor ya que ahí llegó el hidrógeno directamente al motor y así pudo funcionar para realizar las pruebas posteriores (Anexo 10). Se tuvo en cuenta que el recipiente de agua que alimentó a los tres generadores debe estar 10 cm por arriba del sistema, esto con el fin de que la gravedad ayude a la distribución del agua.

En figura 4.5. se puede observar el diseño del esquema de instalación del sistema de generación de hidrógeno en el motor de cuatro tiempos:

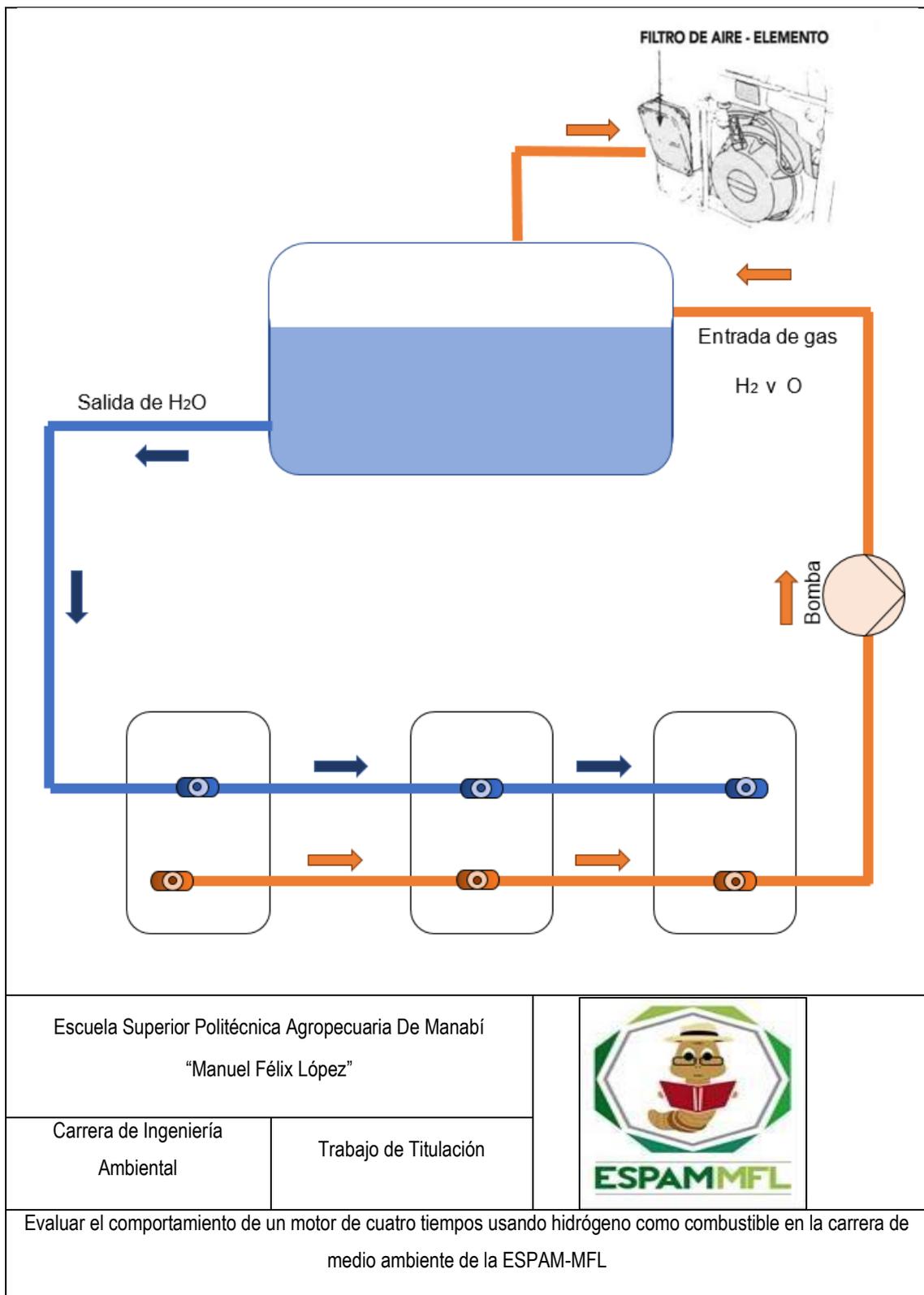


Figura 4.5: Esquema del sistema total, adaptado en el motor.

Fuente: (Ortiz y Pardo, 2019).

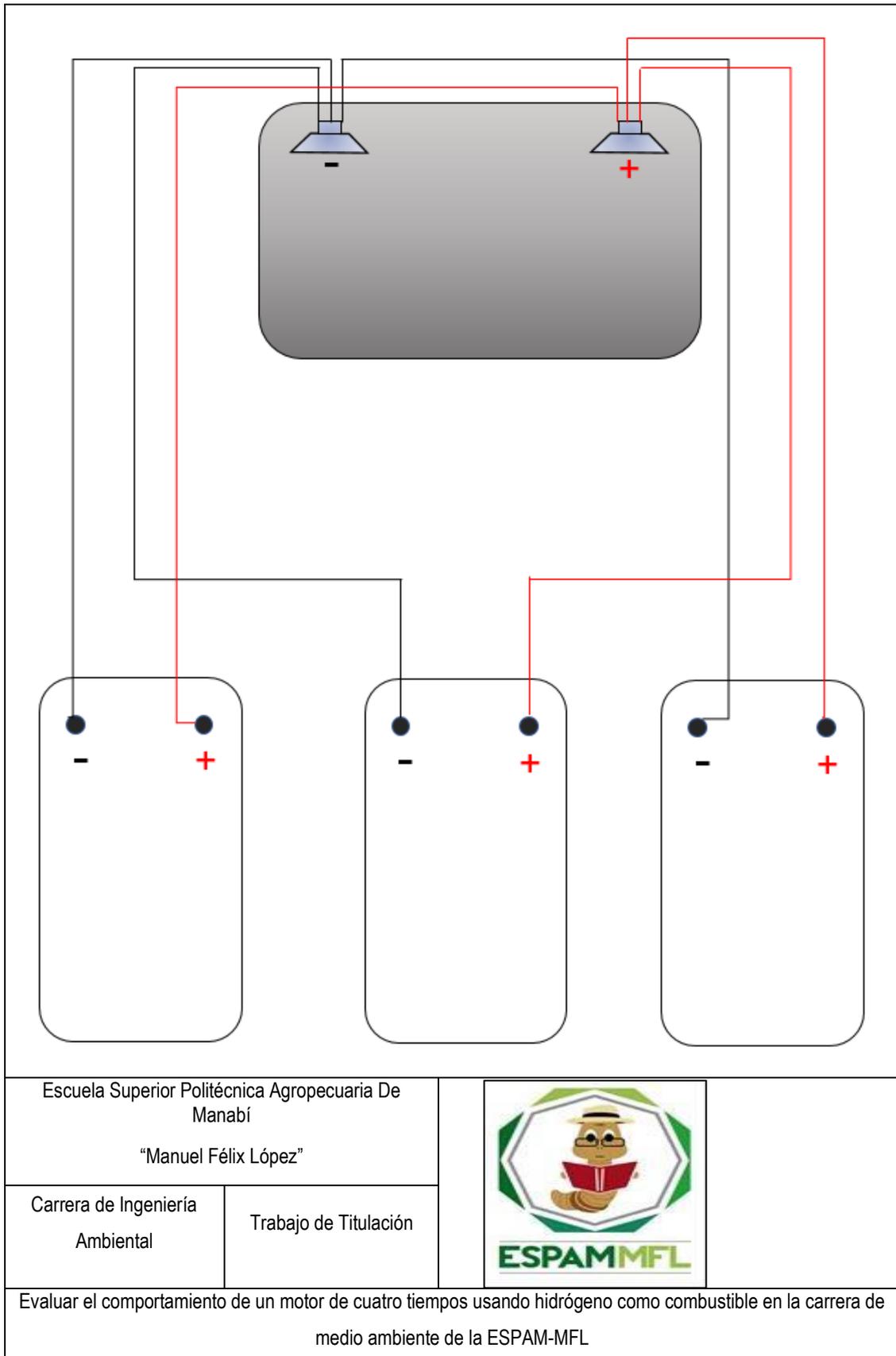


Figura 4.6. Esquema de conexión eléctrica en el sistema de generación de hidrógeno.

Fuente: (Ortiz y Pardo, 2019).

4.2. COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL MOTOR USANDO HIDRÓGENO Y GASOLINA COMO COMBUSTIBLES

4.2.1. Medición de temperatura

Las pruebas realizadas en el motor, mostraron los distintos niveles de temperatura que existió con el uso de gasolina e hidrógeno como combustibles.

El cuadro 4.8. muestra los resultados obtenidos por el termómetro infrarrojo GM320:

Cuadro 4. 8. Medición de temperatura del motor.

| Tipo de Combustible | Tiempo (s) | Temperatura del motor (°C) |
|---------------------|------------|----------------------------|
| Gasolina | 60 | 64,3 |
| Hidrógeno | | 44,2 |
| Gasolina | 120 | 78,6 |
| Hidrógeno | | 57,3 |
| Gasolina | 180 | 86,1 |
| Hidrógeno | | 63,2 |
| Gasolina | 240 | 103,9 |
| Hidrógeno | | 80 |
| Gasolina | 300 | 105,6 |
| Hidrógeno | | 81,7 |

Fuente: Ortiz y Pardo, (2019).

En el cuadro 4.8. se observa que el nivel de temperatura asciende conforme avanza el tiempo de encendido del motor. Según Zambrano y Mendoza (2017), esto sucede porque las revoluciones de un motor calientan el mismo por el movimiento de los pistones y la combustión del combustible con el paso del tiempo. Los mismos autores mencionan que, el tiempo mínimo para que la temperatura se estabilice debe ser de cinco minutos (300 s). Asimismo, los resultados de temperatura mostraron una variación de los niveles de temperatura del motor usando gasolina e hidrógeno como combustibles. En el cuadro mencionado se observa que, en 300 s de usando gasolina el motor presentó una temperatura de 105,6 ° C frente a la temperatura de 81,7 ° C que fue obtenida con el uso hidrógeno. Siendo el hidrógeno el combustible que presentó un 29,25% más de eficiencia que la gasolina.

Según Fernández y Duarte (2013), la temperatura óptima para que el motor funcione sin problema debe ser entre 85 ° C y 95 ° C. Los mismos autores mencionan que, si la temperatura del motor sobrepasa los 100 ° C, en el motor

baja la viscosidad del aceite y aumenta el desgaste de las piezas del mismo, lo que puede provocar una fundida del motor. Sin embargo, en los resultados del cuadro 4.8. se observa que los análisis obtenidos en el motor con el uso de gasolina en tiempos de 240 s y 300 s, el motor sobrepasa la temperatura óptima mencionada previamente; las temperaturas obtenidas en 240 s y 300 s, fueron de 103,9 ° C y 105,6 ° C respectivamente. Esto se debe a que el motor de cuatro tiempos que se usó para las pruebas, no tiene un sistema de refrigeración como el que tienen la mayoría de motores, tan solo usa un sistema de ventilación de aire proveniente del ambiente. Esto concluye que, el uso de gasolina en el motor de prueba, puede llegar a fundirlo muy pronto. Sin embargo, se aprecia que la temperatura del motor usando hidrógeno en los tiempos de 240 s y 300 s fueron 80 ° C y 81,7 ° C respectivamente.

4.2.2. Medición de ruido

La determinación de los niveles de ruido analizados en el motor por el sonómetro, mostraron la diferencia de sonoridad que existe en el motor al momento comparar el uso de gasolina e hidrógeno como combustibles (Anexo 12).

Cuadro 4.9. Medición del ruido

| Tipos de combustible | Tiempo de encendido (s) | Ruido (dB) |
|----------------------|-------------------------|------------|
| Gasolina | 60 | 98,6 |
| Hidrógeno | 60 | 85,4 |
| Gasolina | 120 | 98,5 |
| Hidrógeno | 120 | 85,1 |
| Gasolina | 180 | 98,5 |
| Hidrógeno | 180 | 85,7 |
| Gasolina | 240 | 98 |
| Hidrógeno | 240 | 84,6 |
| Gasolina | 300 | 97,9 |
| Hidrógeno | 300 | 84,5 |

Fuente: Ortiz y Pardo, (2019).

El cuadro 4.9. muestra los análisis del ruido del motor utilizando gasolina e hidrógeno como combustibles. En el cuadro se observó que, al utilizar hidrógeno y gasolina, los niveles de ruido del motor fueron relativamente constantes en cada tiempo (60s, 120 s, 240 s, 300 s). Según Juca (2015), desde el inicio de arranque del motor, el sonido va a permanecer constante, exceptuando que exista una variación de rpm o si haya algún tipo de daño en el motor.

El motor de cuatro tiempos que se usó para los análisis de ruido es un motor estacionario, por lo que las revoluciones del mismo (3600 rpm) permanecieron constantes durante las pruebas. Fue por ese motivo que, en los resultados se observa que los niveles de ruido producidos en el motor al momento de usar gasolina, no tienen cambios significativos en cada tiempo; se observó que el rango de ruido estuvo entre 94,1 dB y 98,7 dB. Asimismo, al momento de usar hidrógeno se observó que los niveles del ruido del motor están en un rango entre 84,5 dB y 85,7 dB. De acuerdo a Rivera (2015), la comparación de ruido entre dos combustibles permite identificar algún tipo de daño interno del motor. El autor menciona que, el combustible que tenga mayor ruido será el que mayor desgaste de piezas internas del motor tenga. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se concluyó que el hidrógeno es aproximadamente un 15,86 % más eficiente que la gasolina, ya que fue el combustible que produjo menos ruido en el motor.

Según Ortiz y Jácome (2010), el nivel de ruido de un motor de cuatro tiempos no debe sobrepasar los 80 dB, caso contrario, existe algún desperfecto dentro del motor. Esto dio a entender que el motor evaluado en esta investigación, tiene problemas internos al momento de usar gasolina en el motor con un rango de nivel de ruido entre 94,1 dB y 98,7 dB (cuadro 4.9.).

4.2.3. Consumo de combustible

El consumo de combustible en el motor de cuatro tiempos sirvió para identificar el tipo de combustible que se consume más rápido (Anexo 13). A continuación, se muestran los valores obtenidos con los diferentes medidores de flujo para cada tipo de combustible:

Cuadro 4. 10. Medición del consumo de combustible usando gasolina e hidrógeno

| Tipo de combustible | Tiempo (s) | Consumo (l/min) |
|---------------------|------------|-----------------|
| Gasolina | 60 | 0,51 |
| Hidrógeno | 60 | 0,60 |
| Gasolina | 120 | 1,03 |
| Hidrógeno | 120 | 1,19 |
| Gasolina | 180 | 1,55 |
| Hidrógeno | 180 | 1,79 |
| Gasolina | 240 | 2,06 |
| Hidrógeno | 240 | 2,36 |
| Gasolina | 300 | 2,58 |
| Hidrógeno | 300 | 2,96 |

Fuente: Ortiz y Pardo (2019).

En el cuadro 4.10. se muestran los resultados del consumo de gasolina e hidrógeno en el motor de cuatro tiempos. Según Francesc (2015), el consumo teórico de gasolina para un motor de cuatro tiempos debe ser de 29 l a 33 l en una hora, 0,55 l consumidos aproximadamente por cada minuto. De este modo, se observó en los resultados mostrados que el consumo de gasolina en un tiempo de 60 segundos fue de 0,51 l, cantidad semejante a la propuesta por Francesc (2015).

Según Aguilar y Cuvi (2016), el consumo aproximado de hidrógeno como combustible es de 0,6 l por minuto. Cantidad que coincide con la tomada por el medidor de flujo de hidrógeno. En el cuadro se observa que en 60 s se consumió 0,6 l de hidrógeno, en el tiempo de 120 s hubo un consumo de 1,19 l de hidrógeno; cantidades que coinciden con lo propuesto por los autores.

En los resultados obtenidos del consumo del motor para cada combustible, se observó que a medida que aumenta el tiempo, aumenta el consumo de combustible. En el cuadro 4.9, se observó que el motor tuvo un consumo aproximado de 2,96 l en 300s de combustible de hidrógeno, y 2,58 l de consumo de gasolina para el mismo tiempo. Aunque aparentemente no hay variación de consumo entre cada combustible, se observó una diferencia de consumo de 14,72%. Es decir, el hidrógeno como combustible se quema 14,72% más rápido que la gasolina.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Fue necesario la construcción de tres generadores y utilizar como electrolito la cantidad de 0,10 kg de hidróxido de potasio, cinco litros de agua en un tiempo de 300 s y con una corriente de 8 A para obtener la concentración de 26.557 ppm de hidrógeno. Dicha cantidad fue la adecuada para que el motor de cuatro tiempos funcione sin problema.
- Los resultados mostraron que el hidrógeno generó menos temperatura que la gasolina (81,7 °C y 105,6 °C respectivamente). Del mismo modo, el hidrógeno presentó menores niveles de ruido en el motor en comparación al uso de gasolina (85,7 dB y 98,5 dB respectivamente). Finalmente, el consumo de combustible del motor fue superior en el hidrógeno, eso sucedió porque el hidrógeno tiene un octanaje superior al de la gasolina.
- Los resultados revelaron que el combustible con mayor eficiencia fue el hidrógeno, puesto que los resultados de temperatura y ruido del motor presentaron valores de eficiencia superiores a los mostrados por el uso de gasolina, sin embargo, el uso de gasolina como combustible tuvo menor consumo. Esto se traduce en que, según los resultados previamente mostrados, la eficiencia del motor usando hidrógeno como combustible es 10,13 % más eficiente que al usar gasolina. La eficiencia obtenida no satisfizo la idea a defender de la investigación de 25 %, sin embargo, se puede mejorar la eficiencia del combustible de hidrógeno mejorando el sistema de producción del mismo.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para la construcción de un generador de hidrógeno, se recomienda usar electrodos como el oro o níquel, para que ayude a mejorar la eficiencia de producción de hidrógeno. Del mismo modo, se recomienda utilizar un burbujeador en el generador. El burbujeador sirve como recipiente de almacenamiento de agua y como filtro purificante de hidrógeno.
- Para mejorar la eficiencia del motor, se recomienda unir el hidrógeno con gasolina. Ya que, unidos producen suficiente energía para que el motor tenga un 50 % más de eficiencia que en relación al hidrógeno o a la gasolina por sí solos. Asimismo, si se piensa en unificar el hidrógeno y gasolina, se necesita cambiar el sistema de admisión de combustible del motor, ya que las porciones de hidrógeno y gasolina deben ser exactas para no tener contratiempos y así evitar algún tipo de daño.
- Se recomienda aumentar el número de generadores cuando se desee usar hidrógeno en motores superiores a 5.5 hp de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Arboleda, M. Campos, C. (2013). *Construcción y adaptación de un sistema de electrólisis de agua para inyectar hidrógeno a un motor General Motors 1300 CC para mejorar su eficiencia*. Obtenido de UTN: <http://repositorio.utn.edu.ec>
- Benavides, W. (2018). *Generador de hidrógeno como reductor de gases, contaminantes para los motores Kia, en el 3ero de bachillerato de la institución educativo particular "LATINOAMERICANO" en el sector de Lumbisi, año lectivo 2017-2018*. Quito, EC. Obtenido en <http://www.dspace.uce.edu.ec>.
- Bolaños, C. (2005). *Almacenamiento del Hidrógeno: Energía del Hidrógeno*, pag 127.
- Cabrera, I. y Figueroa, E. (2012). *Situación energética en el Ecuador. Análisis técnico y económico para el uso eficiente de la energía*. Cuenca, EC. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec>.
- Cando, H. Quelel, Manosalva (2012). *Construcción y adaptación de un sistema generador de gas hidrógeno*. Ibarra, EC. Obtenido en <http://repositorio.utn.edu.ec>
- Carrasco, C., y Rodríguez, J. (2010). *"El hidrógeno Fuente de energía renovable"*, Universidad Nacional Autónoma De México, Pág. 3.
- Chamarravi, O y Saavedra, G. (2013). *Evaluación del impacto ambiental generado por la emisión de gases en motores que utilizan complementos lubricantes, en la ciudad de Bogotá*. Bogotá, COL. Obtenido de Umanizales: <http://ridum.umanizales.edu.co>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Derecho de la población a vivir en un ambiente sano*. Obtenido de https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf

- Consejo de Seguridad Nuclear de España [CSN] (2014). *La energía nuclear*. Madrid, ES. Obtenido de <https://www.csn.es>.
- Cuesta, J. (2016). *Electrólisis a alta temperatura*. Sevilla: Dep. Ingeniería Energética. Obtenido en <https://idus.us.es>
- Díaz, A. González, J. González, O. (2017). *Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna*. Floridablanca, COL. Obtenido en <https://dialnet.unirioja.es>.
- Díaz, J y Gallardo, P. (2016). *"Importancia en el uso eficiente de vehículos"*. El Telégrafo, pag 1.
- Duque, E. y Masaquiza, J. (2013). *Implementación de un generador e inyector de hidrógeno en un motor de vehículo Mazda BT-50 2.2 L, para reducir emisiones de gases contaminantes*. Riobamba, EC. Obtenido en <http://dspace.esPOCH.edu.ec>.
- ExxonMobil. (2013). *The Outlook of Energy: A view of 2040 Exxon Mobil Corporation*. Obtenido de: <http://www.iner.gob.ec>
- Fernández, F y Duarte, J. (2013). *Módulo para la medición de variables en motores de combustión interna*. Obtenido en: <http://www.scielo.org.co/pdf/entra/v9n2/v9n2a18.pdf>
- Flores, E. (2016). *Almacenamiento*. Recuperado el viernes de Febrero de 2018, de ptolomeo.unam.mx: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10343/tesis.pdf?sequence=2>
- García, J y Burbano, J. (2016). *Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano, hidrógeno con respecto al metano*. Medellín, COL. Obtenido de <https://ingenius.ups.edu.ec>.
- Godoy, P. (2011). *Mecánica Automotriz: Llegada del aceite*. Obtenido en <https://www.academia.edu>
- INEC (2014). "Información ambiental en hogares 2014". Recuperado de :<http://www.ecuadorencifras.gob.ec>.

- Juca, C. (2013). Identificación de espectros acústicos en motores de combustión interna a través del análisis en tiempos cortos. Cuenca, EC. Obtenido en: <https://dspace.ups.edu.ec>
- López, J. (2018). Alimentación de un motor monocilíndrico con hidrógeno obtenido a través de la electrólisis del agua. Loja, EC. Obtenido en <http://dspace.unl.edu.ec>.
- López, N. (2006). Usos de la electricidad para la obtención de hidrógeno a través de la electrólisis de. *Universidad de Costa Rica*, 60 .
- De Lucas, J. (2012). Manual de Buenas Prácticas Medioambientales en el Transporte: *Principales aspectos ambientales*. Obtenido en <https://www.juntadeandalucia.es>.
- Martínez, A. y Caro, R. (2011). *Fuentes energéticas*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es>.
- Orozco, J. (2014). Utilización de gas combustible en motores de cuatro tiempos. Mercedes: Universidad Earth. Obtenido en: <https://dialnet.unirioja.es>.
- Ortiz, N. Jácome, S. (2010). *Diseño y construcción de un prototipo de silenciador de sonido variable para sistemas de escape de motores de combustión interna de cuatro tiempos de 200cc*. Sangolquí, ES. Obtenido en <https://repositorio.espe.edu.ec>
- Oviedo, J. Badii, M. Guillen, A y Lugo, O. (2017). *Historia y uso de energías renovables*. San Nicolás de los Garza, MX. Obtenido de <http://www.spentamexico.org>.
- Peretti, H. (2013). Hidrógeno, combustible del futuro: Por qué, cómo y dónde. Bariloche, AR. Obtenido en: <http://kimerius.com>
- Quedaza, E. (Lunes de Diciembre de 2014). *Implementación de un generador de Hidrogeno en un Vehiculo*. Recuperado el 12 de Febrero de 2018, de dspace: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7354/1/UPS-CT004305.pdf>

- Ramos, M. F. (2008). Hidrógeno aplicación en motores de combustión interna. Barcelona, ES. Obtenido en: <https://upcommons.upc.edu>
- Rodríguez, A. (2016). *Análisis comparativo de los sistemas de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables*. Sevilla, ES. Obtenido en <http://bibing.us.es>.
- Sagñay, R. (Julio de 2016). *Determinar las características del motor 3.7L V6 TI-VCT DOCH de la camioneta Ford F150 y su rendimiento con el uso de biocombustibles*. Riobamba, EC. Obtenido en: <http://dspace.unach.edu.ec>
- Suárez, E. F. (2016). *Estado actual con el hidrogeno*. Ciudad de México, MX. Obtenido en: <http://www.ptolomeo.unam.mx>
- Tamayo, E. Rosales, C. Guzmán, A. y Pazmiño, P. (2016). Efecto del uso de hidrógeno en la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna. Quito, EC. Obtenido en <http://ingenieria.ute.edu.ec>.
- The Fuel Cell. (2007). *Construccion de generador de hidrogeno*. Obtenido en: <http://www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=166>
- Troncoso, P. (2017). *Optimización del recurso energético en la producción de leche*. Osorno, CL. Obtenido de <https://www.agrificiente.cl>.
- Zambrano, D. Mendoza, L. (2017). *Comportamiento de un motor alimentado con biogás, producido a partir del aprovechamiento de excretas de ganado bovino*. Obtenido en <http://repositorio.espam.edu.ec>

ANEXOS

Anexo 1. Piezas de madera que fueron las partes externas del generador.



Anexo 2. Corte de piezas de aluminio.



Anexo 3. Piezas de aluminio que sirvieron como electrodos del generador.



Anexo 4. Piezas de caucho que sirvieron como aislantes entre los electrodos del generador.



Anexo 5. Inserción de los pernos de acero que sirvieron para ajustar el sistema del generador.



Anexo 6. Construcción final del generador de hidrógeno.

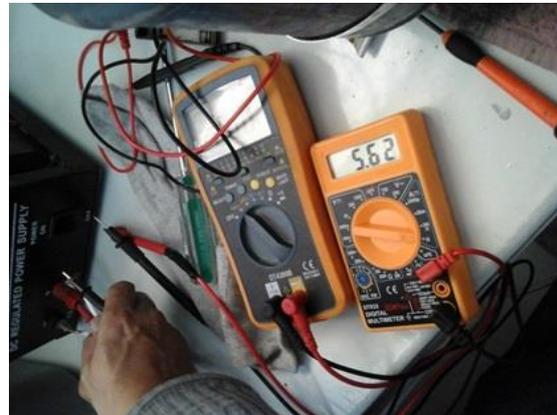


Anexo 7. Pesaje de electrolitos.



Anexo 8. Preparación de la mezcla (electrolito + agua destilada).



Anexo 9. Pruebas de generación de hidrógeno con un solo generador.**Anexo 10.** Instalación de tres generadores de hidrógeno en el motor.

Anexo 11. Sonómetro Sper scientific IEC 61672 -1, utilizado para la medición de ruido del motor.



Anexo 12. Termómetro infrarrojo GM320 utilizado para los análisis de pruebas de la temperatura del motor.



Anexo 13. Pruebas de consumo de combustible con el medidor de flujo
Gas Alert Max XTII

