

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Mecánico Automotriz*

PROYECTO TÉCNICO:

**“ADAPTACIÓN DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO TIPO CELDA
SECA EN UN MOTOR ENDOTÉRMICO 150cc DE 4 TIEMPOS COMO
FUENTE ALTERNATIVA DE COMBUSTIBLE”**

AUTORES:

JUAN NOÉ PESÁNTEZ MOROCHO
JOSÉ VICENTE TACURI MOROCHO

TUTOR:

ING. FREDY GONZALO TACURI MOSCOSO

CUENCA - ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Juan Noé Pesantez Morocho con documento de identificación N° 0107143802 y José Vicente Tacuri Morocho con documento de identificación N° 0105164610, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“ADAPTACIÓN DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO TIPO CELDA SECA EN UN MOTOR ENDOTÉRMICO 150cc DE 4 TIEMPOS COMO FUENTE ALTERNATIVA DE COMBUSTIBLE”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico Automotriz*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, octubre de 2021.



Juan Noé Pesantez Morocho

C.I. 0107143802



José Vicente Tacuri Morocho

C.I. 0105164610

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ADAPTACIÓN DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO TIPO CELDA SECA EN UN MOTOR ENDOTÉRMICO 150cc DE 4 TIEMPOS COMO FUENTE ALTERNATIVA DE COMBUSTIBLE”**, realizado por Juan Noé Pesántez Morocho y José Vicente Tacuri Morocho, obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, octubre de 2021.



Ing. Fredy Tacuri Moscoso MS.c

C.I. 0103369542

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Juan Noé Pesántez Morocho con documento de identificación N° 0107143802 y José Vicente Tacuri Morocho con documento de identificación N° 0105164610, autores del trabajo de titulación: **“ADAPTACIÓN DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO TIPO CELDA SECA EN UN MOTOR ENDOTÉRMICO 150cc DE 4 TIEMPOS COMO FUENTE ALTERNATIVA DE COMBUSTIBLE”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, octubre de 2021.



Juan Noé Pesántez Morocho

C.I. 0107143802



José Vicente Tacuri Morocho

C.I. 0105164610

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación lo dedico a Dios por haberme guiado y llenado de bendiciones en este duro camino en mi vida académica y personal, a mis padres, María Morocho Sigua y Manuel Pesántez, gracias por todo su apoyo, paciencia y esfuerzo los que me han permitido llegar a cumplir hoy una de mis metas personales, gracias por inculcar en mí los valores del respeto, responsabilidad y perseverancia las cuales me han llevado al éxito. A todas las personas que me han apoyado y han hecho que este trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Juan Noé Pesántez Morocho

DEDICATORIA

La presente tesis la dedico principalmente a mi madre María Morocho, quién fue la que me alentó a seguir adelante, me brindó su esfuerzo y sacrificio los cuales realizó para poder culminar mi carrera universitaria.

Quiero además dedicar esta tesis a mi enamorada Lucía Gálvez por su apoyo incondicional y verdadero, durante todos estos años, porque a pesar de las adversidades siempre está conmigo y me apoya en mis sueños y metas.

José Vicente Tacuri Morocho

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme salud y la vida para poder seguirme superando y cosechando grandes logros a nivel personal y académicos. A mis padres, María Morocho y Manuel Pesántez, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida académica por darme la fuerza y fortaleza para seguir adelante siempre con sus consejos.

A mis hermanos que siempre han sido un apoyo incondicional en mi vida personal. Agradecer a toda mi familia y amigos quienes con sus consejos me ayudaron a seguir adelante para obtener esta profesión. Agradezco a mi tutor Ing. Tacuri gracias a su experiencia, conocimientos, motivaciones y amistad nos orientaron a culminar este trabajo de titulación.

Juan Noé Pesántez Morocho

AGRADECIMIENTO

Al Finalizar una etapa extraordinaria de mi vida quiero extender un profundo agradecimiento, a quienes fueron un motor incondicional cada día demostrándome su amor dedicación y paciencia con la que cada día se preocupaban por mi avance en este gran sueño, a mis padres, Gabriel Tacuri por tu apoyo incondicional, por confiar en mí que, si podía cumplir con este sueño, a ti madre María Morocho por haberme inculcado en mí el ejemplo de superación, esfuerzo y valentía, de no temer a todas las adversidades que se crucen en el camino que siempre un paso a la vez, a mi enamorada por brindarme su compañía y su apoyo incondicional por parte de este sueño tu presencia ha sido parte fundamental, has estado conmigo en los momentos más difíciles mi carrera universitaria.

José Vicente Tacuri Morocho

RESUMEN

En este proyecto se realizó una adaptación de un generador de hidrógeno tipo celda seca en un motor endotérmico de motocicleta con una cilindra igual a 150 cc con lo cual se busca una mayor eficiencia en la combustión y una notable reducción en los gases emanados por el motor además de brindar al motor una fuente de alimentación limpia únicamente mediante el uso del hidrógeno.

En el primer capítulo se realizó un estudio acerca del motor OTTO analizando su funcionamiento, parámetros e historia del mismo, así como también las propiedades químicas y físicas del hidrógeno de igual manera se analizaron los métodos de producción y almacenamiento del gas hidrógeno.

En el segundo capítulo se diseñó e implementó la celda de gas hidrógeno y su respectivo sistema de control de amperaje en el motor 150 cc

El tercer capítulo trata sobre el análisis termodinámico teórico del motor Otto 150 cc con el combustible de hidrógeno con las especificaciones que proporciona el fabricante del motor.

En el último capítulo se hicieron varios ensayos con diferentes soluciones con el fin de determinar la solución más óptima para la producción de hidrógeno, una vez determinada la mejor solución se determinó la concentración de hidrógeno que está presente el generador mediante la utilización de un sensor de gas hidrógeno; además, se realizaron pruebas de funcionamiento con el generador y sin el mismo a varios vehículos de inyección a gasolina, asimismo con la utilización del analizador de gases se obtuvieron muestras que sirvieron para determinar mediante el software Minitab 16 la disminución de HC y CO al implementar el hidrógeno.

ABSTRACT

In this project, we performed an adaptation of a hydrogen generator cell-type dry on a motorcycle endothermic motor with a displacement equal to 150 cc, which seeks a greater combustion efficiency and a significant reduction in the gases emitted by the engine in addition to give the engine a clean source of energy only through the use of hydrogen.

In the first chapter a study was made on the OTTO engine analyzing its operation, parameters and history, as well as the chemical and physical properties of hydrogen. The production and storage methods of hydrogen gas were also analyzed.

In the second chapter, the hydrogen gas cell and its respective amperage control system were designed and implemented in the 150-cc engine.

The third chapter deals with the theoretical thermodynamic analysis of the 150 cc Otto engine with hydrogen fuel with the specifications provided by the engine manufacturer.

In the last chapter were performed several tests with different solutions in order to determine the most optimal solution for the production of hydrogen, once you have determined the best solution, we determined the concentration of hydrogen that is present in the generator by the use of a sensor of hydrogen gas; in addition, we tested various vehicles from gasoline injection with and without the generator, and samples were obtained using the gas analyzer is used to determine the decrease of HC and CO to deploy hydrogen using the software Minitab 16.

INDICE GENERAL

| | |
|--|-------|
| CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR | I |
| CERTIFICACIÓN | II |
| DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD | III |
| DEDICATORIA | IV |
| DEDICATORIA | V |
| AGRADECIMIENTO | VI |
| AGRADECIMIENTO | VII |
| RESUMEN | VIII |
| ABSTRACT..... | IX |
| INTRODUCCIÓN..... | XIX |
| PROBLEMA..... | XXII |
| ANTECEDENTES | XXIII |
| IMPORTANCIA Y ALCANCE..... | XXV |
| DELIMITACIÓN | XXVI |
| OBJETIVOS | XXVII |
| CAPÍTULO I. | 28 |
| FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA “USO DEL HIDRÓGENO EN MOTORES DE 4 TIEMPOS A GASOLINA” | 28 |
| Motor..... | 28 |

| | |
|--|----|
| Combustible | 29 |
| Motor Otto de Cuatro Tiempos | 29 |
| Aire estándar | 34 |
| Análisis Termodinámico del Motor de Ciclo Otto..... | 35 |
| Ley de Faraday | 40 |
| Ecuación del Gas Ideal..... | 41 |
| Relaciones de Masa, Masa Molar y Densidad de un Gas | 41 |
| Parámetros Termoquímicos de los Combustibles | 42 |
| Propiedades Fisicoquímicas del Hidrógeno | 44 |
| 1.10.1 Densidad | 44 |
| 1.10.2 Inflamabilidad | 44 |
| 1.10.3 Temperatura de inflamabilidad (“Flash point”) | 45 |
| 1.10.4 Rango de inflamabilidad | 46 |
| 1.10.5 Temperatura de autoencendido | 48 |
| 1.10.6 Número de octano | 49 |
| 1.10.7 Energía de ignición..... | 50 |
| 1.10.8 Velocidad de quemado | 51 |
| 1.10.9 Distancia de apagado..... | 51 |
| 1.10.10 Características de la llama..... | 52 |
| 1.10.11 Reactividad..... | 52 |

| | | |
|--|---|----|
| 1.10.12 | Energía | 54 |
| 1.11 | Producción de Hidrógeno. | 55 |
| 1.11.1 | Termólisis..... | 56 |
| 1.11.2 | Reformado de gas natural..... | 57 |
| 1.11.3 | Gasificación..... | 58 |
| 1.11.4 | Electrólisis | 59 |
| 1.12 | Historia de la Celda Electrolítica..... | 62 |
| 1.13 | Tipos de Celdas Electrolíticas | 65 |
| 1.13.1 | Celdas húmedas de hidrógeno..... | 66 |
| 1.13.2 | Celdas secas de hidrógeno..... | 67 |
| CAPÍTULO II..... | | 69 |
| DISEÑO DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO DE CELDA SECA MEDIANTE CAD PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL MOTOR 4 TIEMPOS DE 150 CC A GASOLINA.” | | 69 |
| 2.1 | Introducción | 69 |
| 2.2 | Criterios de Diseño..... | 69 |
| 2.2.1 | Flujo másico del aire..... | 69 |
| 2.2.1 | Cálculos de producción de gas..... | 71 |
| Análisis Matemático..... | | 76 |
| Diseño | | 78 |

| | |
|--|-----|
| Diseño del Generador..... | 79 |
| Partes del Generador | 84 |
| Circuito de GAS..... | 85 |
| 2.2.2 Elementos del Circuito de Gas..... | 86 |
| Circuito Eléctrico. | 87 |
| 2.2.3 Elementos del circuito eléctrico..... | 88 |
| CAPÍTULO III..... | 89 |
| CÁLCULOS TERMODINÁMICOS EN EL MOTOR 150 CC CON ADICIÓN DE HIDRÓGENO DETERMINANDO LOS PARÁMETROS INDICADOS Y EFECTIVOS DEL MOTOR..... | 89 |
| 3.1 Análisis Termodinámico Real del Motor OTTO 150 CC..... | 89 |
| CAPÍTULO IV | 98 |
| ANÁLISIS DE POTENCIA Y PAR EFECTIVOS DEL MOTOR MEDIANTE LOS RESULTADOS OBTENIDOS..... | 98 |
| 4.1 Resumen..... | 98 |
| 4.2 Recopilación De Muestras | 98 |
| 4.3 Procedimiento de obtención de las muestras..... | 99 |
| 4.4 Medición..... | 100 |
| 4.4.1 Análisis de monitoreo de gases | 101 |
| 4.5 Normativa Ecuatoriana..... | 108 |
| 4.6 Probabilidad de la hipótesis | 110 |

| | |
|---|-----|
| CONCLUSIONES | 115 |
| RECOMENDACIONES..... | 117 |
| ANEXOS | 121 |
| ANEXO 1: Celda de Hidrógeno terminada. | 122 |
| ANEXO 2: Proceso de construcción de la celda de hidrógeno. | 124 |
| Placa Negativa del generador | 125 |
| | 125 |
| Placas Neutras..... | 126 |
| | 126 |
| Placas Positivas del Generador | 127 |
| | 127 |
| ANEXO 3: Burbujeador de sistema..... | 128 |
| ANEXO 4: Acoples tipo L, T idispensables para la correcto señado de la celda..... | 129 |
| ANEXO 5: Resultados de las pruebas de análisis de gases sin el sistema. | 130 |
| Anexo 6: Análisis de gases con el generador de hidrógeno y gasolina. | 139 |
| ANEXO 7: Análisis de gases con el sistema de hidrógeno. | 145 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1 Fases de motor de 4 Tiempos. | 30 |
| Ilustración 2 Ciclo Otto Teórico - Admisión | 30 |
| Ilustración 3 Ciclo Otto Teórico - Compresión. | 31 |
| Ilustración 4 Ciclo Otto Teórico - Explosión..... | 31 |
| Ilustración 5 Ciclo Otto Teórico - Escape. | 32 |
| Ilustración 6 Diagrama P-V de ciclo Otto Teórico | 33 |
| Ilustración 7 Ciclo de un motor de dos tiempos | 34 |
| Ilustración 8 Ciclo Termodinámico real de un motor..... | 35 |
| Ilustración 9 Diagrama de trabajo del Ciclo Otto ideal: Presión- Volumen | 36 |
| Ilustración 10 Rangos de inflamabilidad de diferentes combustibles a temperatura ambiente | 48 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 11 Rangos de inflamabilidad de diferentes combustibles a temperatura ambiente | 48 |
| Ilustración 12 Estados de la energía Química..... | 54 |
| Ilustración 13 Formas de obtener hidrógeno | 56 |
| Ilustración 14 Componentes del gas de síntesis..... | 57 |
| Ilustración 15 Celda Electrolita. | 60 |
| Ilustración 16 Elementos que Forman parte del proceso de la electrolisis | 61 |
| Ilustración 17 Celda de Hidrógeno | 63 |
| Ilustración 18 Historia de Celda de Combustible | 65 |
| Ilustración 19 Celdas Húmedas de Hidrógeno.) | 66 |
| Ilustración 20 Generador de Celda Seca..... | 67 |
| Ilustración 21 Celdas Secas de Hidrógeno | 68 |
| Ilustración 22 Cantidad de masa de combustible según las revoluciones del motor | |
| Fuente: Autores | 71 |
| Ilustración 23 Partes del generador de hidrógeno..... | 79 |
| Ilustración 24 Placa de Ingreso y Salida..... | 80 |
| Ilustración 25 Placa Neutra..... | 82 |
| Ilustración 26 Electrodo Positivo y negativo. | 82 |
| Ilustración 27 Junta de goma EPDM de alta densidad. | 83 |
| Ilustración 28 Pieza que conforman el generador..... | 83 |
| Ilustración 29 Ensamble final del generador | 84 |
| Ilustración 30 Bosquejo de la trayectoria del gas. | 86 |
| Ilustración 31 Circuito de control | 87 |
| Ilustración 32 PBC del Circuito de Control..... | 88 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 33 Ciclo termodinámico teórico Ciclo termodinámico teórico | 90 |
| Ilustración 34 Ciclo termodinámico teórico Ciclo termodinámico teórico | 90 |
| Ilustración 35 Histograma de Monóxido de carbono en ralenti solamente con gasolina. | 101 |
| Ilustración 36 Histograma de Monóxido de carbono en ralenti solamente con hidrógeno | 102 |
| Ilustración 37 Histograma de Monóxido de carbono en ralenti gasolina e hidrógeno .. | 102 |
| Ilustración 38 Histograma de Hidrocarburos en ralenti solamente con gasolina | 103 |
| Ilustración 39 Histograma de hidrocarburos en ralenti solamente con hidrógeno | 104 |
| Ilustración 40 Histograma de hidrocarburos en ralenti gasolina e hidrógeno. | 104 |
| Ilustración 41 histograma de Dióxido de carbono en ralenti con gasolina. | 105 |
| Ilustración 42 histograma Dióxido de carbono ralenti hidrógeno | 105 |
| Ilustración 43 Histograma de Dióxido de carbono en ralenti con gasolina e hidrógeno | 106 |
| Ilustración 44 Histograma de Oxígeno en ralenti gasolina..... | 106 |
| Ilustración 45 Histograma de Oxígeno en ralenti hidrógeno | 107 |
| Ilustración 46 histograma de Oxígeno en ralenti gasolina e hidrógeno..... | 108 |
| Ilustración 47 Diferencia entre las medias de las muestras %CO | 112 |
| Ilustración 48 Variación de CO | 113 |
| Ilustración 49 Variación de HC | 114 |
| | |
| Tabla 1 Poderes caloríficos de Diferentes Combustibles | 42 |
| Tabla 2 Limites de inflamabilidad de distintos combustibles con aire..... | 45 |
| Tabla 3 Punto de inflamación de combustibles. | 46 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 4 Temperatura de Autoencendido..... | 49 |
| Tabla 5 Cantidad de octanos en diferentes combustibles | 50 |
| Tabla 6 Comparación de la densidad de la energía | 55 |
| Tabla 7 Presión atmosférica dependiendo de la altura. | 70 |
| Tabla 8 Producción de gas | 73 |
| Tabla 9 Elementos del Generador de hidrógeno..... | 84 |
| Tabla 10 Componentes del Circuito Eléctrico | 86 |
| Tabla 11 Lista de Materiales..... | 88 |
| Tabla 12 Datos Iniciales | 90 |
| Tabla 13 Calor Especifico H_2 | 92 |
| Tabla 14 Comparación con la normativa ecuatoriana de las muestras obtenidas en las diferentes pruebas | 109 |
| Tabla 15 Método (Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis)..... | 110 |
| Tabla 16 Desv.Est. agrupada = 0,0359398 | 110 |
| Tabla 17 Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.... | 110 |
| Tabla 18 Valor $p = 0.000$ | 111 |
| Tabla 19 Resultados de la prueba de análisis de gases. | 112 |

INTRODUCCIÓN

El planeta entero está viviendo en un escenario indiscutible que debe aceptar que las reservas del mundo de hidrocarburos se están agotando rápidamente, y es preciso reemplazar esta fuente de energía por otra: una de las alternativas sustentables es el gas H₂ (hidrógeno), una de las sustancias presentes en el agua, parece actualmente el aspirante idóneo para producir energía mediante la combustión electroquímica en motores endotérmicos de 4 tiempos.

(Jordi, Llorca Piqué 2010) afirma lo siguiente:

“Ante la necesidad que tiene la humanidad para mitigar el impacto ambiental causado por la acumulación en la atmósfera de dióxido de carbono, gas de efecto invernadero, mismo que produce calentamiento global y que proviene del funcionamiento de los motores de combustión interna, que utilizan combustibles derivados del petróleo, la comunidad científica internacional al momento despliega un sinnúmero de investigaciones y estudios que permitan encontrar un método para la obtención de hidrógeno, que sea seguro, ecológico y a la vez mucho más económico que el combustible convencional.”

El hidrógeno, del que rebozantes sostienen que permitirá tratar en lo posterior de una "economía de hidrógeno", esto es, que dicho carburante será el eventual futuro de los carburantes estafermos, descansando sobre el aumento tecnológico de la merced, como hogaño lo hace mayoritariamente sobre los carburantes anacronismos. El hidrógeno es una de las mejores elecciones para ser el carburante que haga factible la rebaja del cargo de carburantes estafermos.

No es un carburante más, puesto que en la última división se han depositado muchas expectativas para convertirlo en un suplente del carburante actual por sus propiedades físicas y químicas latamente múltiples de lo demás carburantes y los detectives han encaminado sus valores a la exploración de su útil aplicación. Expresando esto, el hidrógeno es un vector energético, señalando que es un transportador de resolución. Esto supone que se ha de ocasionar a partir de manantiales energéticas, conteniendo una cierta puntuación de resolución una oportunidad gestada

No es un sumario natural, en otras palabras, no se encuentra de la manera incomunicada en el medio ambiente, sino que se encuentra combinando en otros acicalados, como los hidrocarburos o el agua. Por lo cual, es forzoso producirlo por distintos medios, siendo éste un gollete de garrafa para hábito masivo en el futuro, y uno de los labrantíos en los que más se están invirtiendo, ya que varias de las conveniencias que cabe eliminar del hidrógeno que en su ignición solamente genera enardecimiento y gas de agua, sus usufructos pueden terminar anuladas en dependencia del método empleando en su elaboración. Una ocasión originada, sus peculiares heredades físicas e industriales dificultan altamente las profesiones

de comercio, fundamentalmente las relacionadas con su almacenaje, transporte y disposición por su entrada inflamabilidad del butano.

La pesquisa actual permite contribuir con una discusión al respecto de la gestación de carburantes anacronismos ante el impacto ambiental que generan estos, poniendo en funcionamiento un motor endotérmico con la implementación de hidrógeno en su ignición.

Los motores de combustión interna a gasolina tienen conocidos problemas de eficiencia térmica y alto índice de emisión de gases contaminantes (Sergio Frutos s. f.).

Por otro lado, existen procesos químicos y eléctricos que han permitido obtener fuentes de energía limpia del agua. La electrólisis permite mediante un proceso electroquímico la obtención de gas de hidrógeno y oxígeno, de cuya mezcla se obtiene H_2 . Las características moleculares del H_2 permiten la disminución de gases tóxicos al ambiente y el ahorro de combustibles hidrocarbonados en motores de combustión interna. (Alejandro y José 2010).

PROBLEMA

En la Ciudad de Cuenca en la actualidad se durante los últimos años se evidencia un gran incremento de contaminación ambiental la gran parte de esto es emitido por el parque automotor de la Ciudad, los cuales dependen de la explotación de los recursos no renovables como es el petróleo.

La contaminación produce y emite gases contaminantes como: Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO₂), Material Particulado (MP); los mismos que tienen grandes repercusiones en la salud de las personas de la ciudad de Cuenca.

Por ello existe la necesidad de mejorar el funcionamiento del motor de combustión interna con la combustión de hidrogeno dentro del cilindro ayudaría notablemente a la eficiencia del motor y reduciendo la contaminación ambiental que existe.

ANTECEDENTES

(Según Ortiz Sánchez Daniel Fernando y Pardo Castillo Muy Cristofué mayo 2019 pago 59) afirma lo siguiente:

“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.”

(Según ROMERO, 20 pago 148) afirma lo siguiente:

“La corriente que circule por las placas no debe ser mayor a 8 amperios, debido a que al sobrepasar este amperaje el gas que producirá el generador tendrá una alta concentración de vapor de agua debido a que la temperatura es elevada en las placas. Entre mayor sea el número de placas negativas va a existir mayor producción de hidrógeno debido a que en el polo negativo es donde se descompone el hidrógeno del agua.”

En el año 2013 la universidad libre en la ciudad de Bogotá plantea el siguiente proyecto “EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA POR IGNICIÓN UTILIZANDO COMO COMBUSTIBLE MEZCLA DE GASOLINA CORRIENTE CON HIDRÒGENO AL TREINTA POR CIENTO (30 %) EN VOLUMEN.”

En donde tienen como objetivo ilustrarse el funcionamiento del motor trabajando netamente con nafta teniendo en cuenta el consumo, torque, potencia y observar el porcentaje de contaminación de los siguientes componentes; hidrocarburo, monóxido de carbono y dióxido de carbono, en este documento plasman las siguientes tesis de sus análisis: • Las emisiones del motor utilizando el equipo son notablemente reducidas debido a la implementación del hidrógeno (fotografía 28), adonde el monóxido se redujo en un 0,20%, los hidrocarburos bajaron 154ppm y el dióxido subió un 2,88% mostrando una mejor calidad de combustión. • Los números de potencia y torque obtenidos en la práctica utilizando nafta son menores que los estipulados por el fabricante gracias al desgaste continuo del motor durante en torno a 17 años y 160.000 Km recorridos, luego, el motor está en buenas condiciones como su compresión, sincronización, refrigeración y lubricación para la implementación del equipo. (Rodríguez, 2013)

IMPORTANCIA Y ALCANCE

Esta investigación tiene como objetivo dar a conocer a los estudiantes en general de Ingeniería Automotriz las diferentes fuentes alternativas de combustible como es el hidrógeno, así como su alto potencial para el mejoramiento de los motores de combustión interna.

Por otro lado, el parque automotor, en la Ciudad de Cuenca va en crecimiento cuales usan combustibles fósiles (Gasolina) la que genera grandes cantidades de gases contaminantes y estos afectan directamente a la atmósfera y la salud de los habitantes. Por ello se propuso llevar a cabo el proceso de electrólisis en el agua, dado que esta, al estar compuesta tanto de hidrógeno como de oxígeno, permitirá obtener un gas altamente inflamable que ayude a reducir el alto grado de contaminación.

DELIMITACIÓN

El presente proyecto beneficiará al Grupo de Investigación de movilidad y Transporte (GIMT), (en la línea de eficiencia energética dentro del proyecto denominado Estudio de la contaminación ambiental causada por los vehículos motorizados en la ciudad de Cuenca), de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana.

OBJETIVOS

Objetivo General

Adaptar un generador de hidrógeno tipo celda seca mediante diseño y construcción para el funcionamiento de un motor endotérmico 150cc de 4 tiempos como fuente alternativa de combustible.

Objetivos Específicos:

- Definir el uso del hidrógeno en motores de 4 tiempos a gasolina mediante investigaciones desarrolladas en la última década estudiando los resultados obtenidos.
- Diseñar el generador de hidrógeno de celda seca mediante CAD para su implementación en el motor de 4 tiempos de 150 cc a gasolina.
- Aplicar cálculos termodinámicos en el motor 150 cc con adición de hidrógeno determinando los parámetros indicados y efectivos del motor.
- Analizar los parámetros efectivos como potencia y par mediante estadística descriptiva interpretando sus resultados.

CAPÍTULO I.

**FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA “USO DEL HIDRÓGENO EN
MOTORES DE 4 TIEMPOS A GASOLINA”**

Motor

La parte vital de una ciclomotora es el motor, dependiendo de la tenacidad o explotación de la ciclomotora, se establece la índole de la maquina (motor). Las ciclomotoras, son propulsadas comúnmente por un motor de nafta de dos o cuatro periodos (2t y 4t). Los motores de 2 lapsos son mayormente explotados en cilindradas reducidas debido a causas medioambientales por tal discernimiento la gran totalidad de las motos que circulan por las vías en la actualidad en recorrido son de cuatro lapsos. Las ciclomotoras antiguas, y algunas motos de avenida, utilizan individualidades de dos cursos pues alcanzan un impresionante pico de intrepidez para su grosor. El motor está planeado para quemar óleo, las regulaciones de retransmisiones han limitado las ventas en los últimos años.

El número de cilindros varía desde uno, usual en cilindradas más pequeñas, hasta 6 en línea, siendo disposiciones muy frecuentes los 4 en línea y dos en V con diferentes ángulos utilizados en motocicletas de alta gama y cilindradas mayores a 250cc. El motor va posicionado de modo transversal, el cigüeñal es perpendicular a la marcha, independientemente del número de cilindros. La lubricación se hace de modo común para el motor y el cambio. La alimentación se hace por carburador para las motocicletas comunes y a inyección para las modernas de gama alta en lo referente al encendido en un principio se deba por platinos y magnetos sin disponer de una batería, años después, de manera análoga

que, en los vehículos, por bobina y batería, luego por encendido transistorizado y por último totalmente electrónico. (M. Arias, 2008)

Combustible

Muchos de los motores de dos tiempos, utilizan una combinación de gasolina sin plomo y aceite a una medida de 1:40 a 1:50, siendo la gasolina el compuesto de mayor presencia (R. Mourelo, 2012).

Motor Otto de Cuatro Tiempos

De manera análoga R. Mourelo establece que, se denominan motores de 4 tiempos a aquellos motores térmicos cuyo ciclo de trabajo se compone de cuatro etapas: admisión, compresión, explosión y escape.

Por lo tanto, un ciclo completo de trabajo abarca dos vueltas del cigüeñal (cada 180° de giro de éste comprenderá una de las fases del ciclo de trabajo) (R. Mourelo, 2012).

El motor de combustión interna o motor Otto garantizó un avance significativo en el desarrollo vehicular al ser el primero que logró una aproximación a la teoría que plantea que el calor creado a un volumen constante es capaz de generar gases en el proceso de combustión cuya energía calorífica se transforma en energía física permitiendo que el motor de combustión pase constantemente de un ciclo a otro (Parreño, 2013, pág. 39)

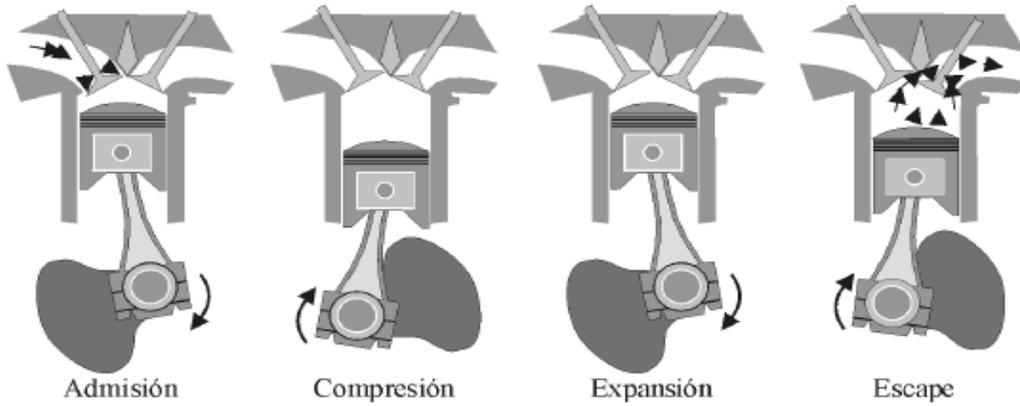


Ilustración 1 Fases de motor de 4 Tiempos.

(Fuente Payri y Desantes 2011)

1: Tiempo 1 (Admisión).

En esta primera fase con sus válvulas respectivas de admisión abiertas y escape cerradas, el émbolo se desplaza desde el punto muerto superior al inferior en dicha acción se crea una pequeña depresión dentro del cilindro lo suficiente para incitar la mezcla (aire - combustible)

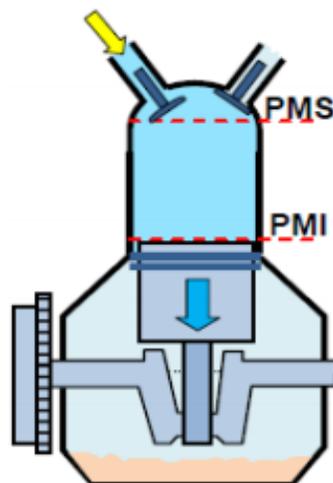


Ilustración 2 Ciclo Otto Teórico - Admisión

(Fuente Molina Aiz, F. D 2010)

2: Tiempo 2(Compresión)

Esta segunda fase con sus válvulas respectivas de admisión y escape cerradas, el embolo se desplaza desde el punto muerto inferior hacia al superior comprimiendo la mezcla contenida en el cilindro que ingreso durante la primera fase (Admisión).

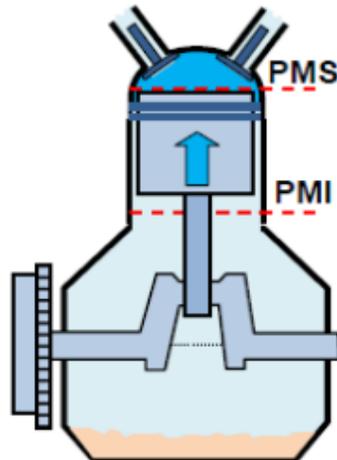


Ilustración 3 Ciclo Otto Teórico - Compresión.

Fuente (Molina Aiz, F. D 2010)

3: Tiempo 3(Explosión)

En el momento en que el pistón está a cercanías del punto muerto superior (PMS), se genera el salto de chispa dentro de la cámara de combustión que produce el encendido de la mezcla, debido a esto se genera un proceso de energía calorífica, aumentando

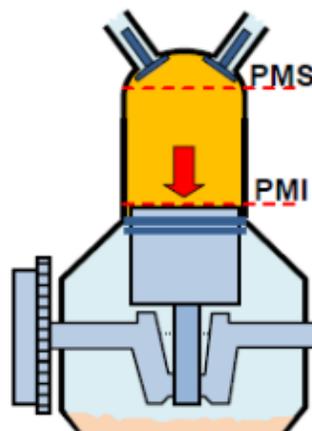


Ilustración 4 Ciclo Otto Teórico - Explosión.

(Fuente Molina Aiz, F. D 2010)

considerablemente la presión y temperatura cual el embolo es empujado hacia el punto muerto inferior (PMI) generando un trabajo superior para vencer a la compresión.

4: Tiempo 4(Escape)

Al llegar el embolo al punto muerto inferior (PMI) la válvula de escape se abre y el embolo comienza a desplazarse hacia el punto muerto superior produciendo la expulsión de los gases quemados producto de la combustión hacia el exterior del cilindro.

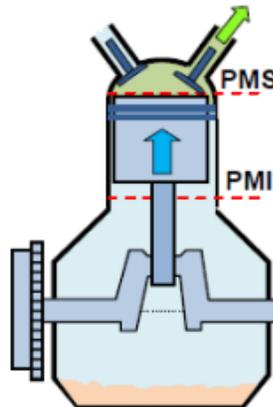


Ilustración 5 Ciclo Otto Teórico - Escape.

(Fuente Molina Aiz, F. D 2010)

El ciclo del motor Otto se lo representa gráficamente mediante el diagrama P-V, se considera según las transformaciones termodinámicas que se representa a continuación:

Admisión (isóbara) en teoría el ingreso de los gases desde la atmosfera al interior del cilindro se lleva a cabo sin fricción, con ello no existe sustracción de carga, por lo cual la presión dentro del cilindro al cabo de toda su carrera es similar a la atmosférica.

1-2 Compresión (Adiabática): Al realizarse de forma tan rápida el estado de compresión, la mezcla estequiométrica no intercambia calor con el medio exterior por lo que se interpreta a esta transformación a calor constante.

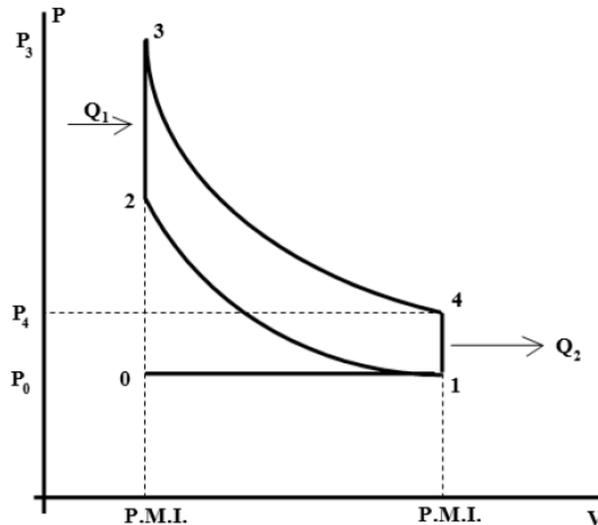


Ilustración 6 Diagrama P-V de ciclo Otto Teórico
(Fuente Molina Aiz, F. D 2010)

2-3. Combustión (isócara) al momento del salto de la chista se produce la ignición instantánea de la mezcla, dando lugar a una cierta cantidad de calor (Q_1). Debido a que se da manera rápida la combustión, se interpreta que el pistón no efectuado desplazamiento alguno, por lo que el volumen en el interior de la cámara es constante.

3-4.- Trabajo (Adiabática): Debido a la rapidez de giro del motor los gases combustionados, no les da tiempo intercambiar calor con el exterior, por lo que se considera una transformación a calor constante.

4-1. Primera fase de Escape (Isócara) Se supone que la abertura de la válvula es escape es momentánea, por lo que genera una evacuación súbita de los gases del interior del cilindro y una pérdida de calor del sistema Q_2 lo que se interpreta una transformación a volumen constante.

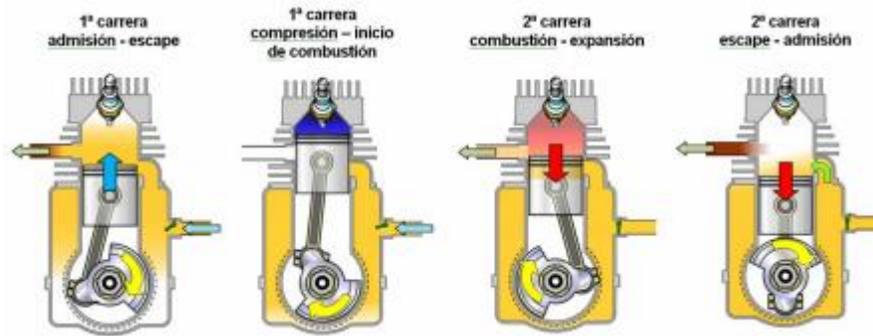


Ilustración 7 Ciclo de un motor de dos tiempos
(Fuente Molina Aiz, F. D 2010)

Aire estándar

Los ciclos de potencia de gases reales son bastante complejos. Para reducir el análisis a un nivel manejable, se utilizan las siguientes aproximaciones, conocidas comúnmente como suposiciones de aire estándar:

1. El fluido de trabajo es aire que circula de modo continuo en un circuito cerrado y siempre se comporta como un gas ideal.
2. Todos los procesos que integran el ciclo son internamente irreversibles.
3. El proceso de combustión es sustituido por un proceso de adición de calor desde una fuente externa.
4. El proceso de escape es sustituido por un proceso de rechazo de calor que regresa al fluido de trabajo a su estado inicial.

Para simplificar más aun el análisis, con frecuencia se emplea la suposición de que el aire tiene calores específicos constantes cuyos valores se determinan a temperatura ambiente (25°C o 77°F).

Cuando se utiliza esta suposición, las de aire estándar son llamadas suposiciones de aire frío estándar. Las suposiciones de aire estándar previamente establecidas permiten

simplificar de modo considerable el análisis sin apartarse de manera significativa de los ciclos reales. Este

modelo simplificado permite estudiar de manera cualitativa la influencia de los parámetros principales en el desempeño de las máquinas reales.

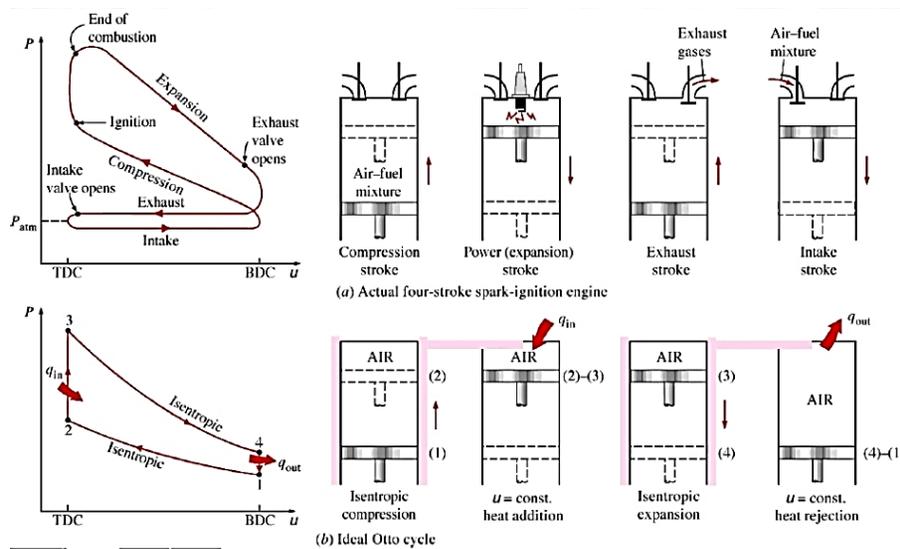


Ilustración 8 Ciclo Termodinámico real de un motor
(Fuente <https://jasf1961.wordpress.com/tag/ciclo-otto/>)

Análisis Termodinámico del Motor de Ciclo Otto.

Para el análisis termodinámico de ciclos reales de un motor Otto se toma en cuenta consideraciones como la del aire estándar, el cuales son 4 procesos que componen el ciclo termodinámico del motor Otto son:

- Compresión adiabática e isotrópica de los puntos 1-2, donde el índice de compresión es γ
- Adición de calor de volumen constante (combustión) de los puntos 2-3

- c) Expansión adiabática e isotrópica de los puntos 3-4, donde el índice de expansión es γ
- d) Rechazo de calor de volumen constante (escape) de los puntos 4-1

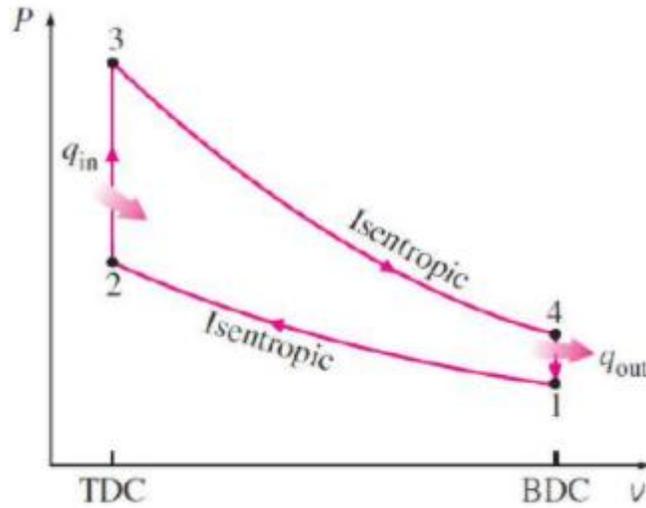


Ilustración 9 Diagrama de trabajo del Ciclo Otto ideal: Presión- Volumen

Fuente: CENGEL Yunus, BOLES Michael. Termodinámica.

Masa de aire en el cilindro:

$$m_1 = \frac{p_1 V_1}{RT_1}$$

Ecuación 1

Masa de aire atrapada en el cilindro, m_{ta} :

$$m_{ta} = \rho * V_T * \eta * i \quad \text{Ecuación 2}$$

Eficiencia volumétrica

$$\rho = \frac{P_{at}}{R_a T_{at}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Masa de Combustible

$$m_{tf} = \frac{m_{ta}}{AFR} \quad \text{Ecuación 2}$$

Energía Liberada por el Combustible

$$Q_3^2 = \eta_c m_{tf} C_{fl} \quad \text{Ecuación 3}$$

Proceso 1-2 Compresión adiabática e isotrópica

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-\gamma} = p_1 CR^\gamma \quad \text{Ecuación 4}$$

Temperatura final de la Compresión, T_2 :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} = (CR)^{\gamma-1} \quad \text{Ecuación 5}$$

Trabajo Perdido durante la compresión

$$w_1^2 = m_1 C_v (T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 6}$$

Proceso 2-3 Combustión a volumen constante

$$Q_2^3 = U_3 - U_2 + W_2^3 = m_1 C_v (T_3 - T_2) + 0 \quad \text{Ecuación 7}$$

Temperatura T_3

$$T_3 = T_2 + \frac{Q_2^3}{m_1 C_v} \quad \text{Ecuación 10}$$

Presión P_3

$$P_3 = P_2 * \frac{V_2}{V_3} * \frac{T_3}{T_2} = p_2 * \frac{T_3}{T_2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Cambio de energía durante el proceso 2-3

$$U_3 - U_2 = Q_2^3 \quad \text{Ecuación 12}$$

Proceso 3-4 Expansión adiabática e isotrópica

Temperatura al final de la expansión T_4

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{1-\gamma} = (CR)^{\gamma-1} \quad \text{Ecuación 13}$$

Presión al final de la expansión P_4

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{-\gamma} = P_3 (CR)^{-\gamma} \quad \text{Ecuación 14}$$

Trabajo realizado durante la expansión

$$w_3^4 = m_1 C_v (T_4 - T_3) \quad \text{Ecuación 15}$$

El cambio de energía interna realizado durante la expansión es negativo:

$$U_4 - U_3 = m_1 C_v (T_4 - T_3) \quad \text{Ecuación 16}$$

Proceso 4-1 Rechazo de Calor a volumen constante

$$Q_1^4 = U_1 - U_4 + W_4^1 = m_1 C_v (T_1 - T_4) + 0 \quad \text{Ecuación 17}$$

Cambio de energía interna durante el rechazo de calor de 4-1:

$$U_1 - U_4 = Q_4^1 = m_1 C_v (T_1 - T_4) \quad \text{Ecuación 18}$$

Obtención de valores netos para el ciclo

Producción neta de trabajo del ciclo W_{net} :

$$W_{net} = w_1^2 + w_3^4 \quad \text{Ecuación 19}$$

La eficiencia térmica del ciclo Otto viene dada por:

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{Q_2^3} \quad \text{Ecuación 20}$$

La presión efectiva media indicada, P_{mi} , se puede encontrar:

$$P_{mi} = \frac{W_{net}}{V_{sv}} \quad \text{Ecuación 21}$$

La potencia de salida del motor se puede encontrar usando:

$$\dot{W} = W_{net} * \frac{rpm}{120} \quad \text{Ecuación 22}$$

La tasa de consumo de combustible, \dot{m}_f se obtiene a partir de:

$$\dot{m}_f = \text{masa por ciclo de energía} * \text{ciclos de energía por segundo}$$

$$= m_f * \frac{rpm}{120} \quad \text{Ecuación 23}$$

el consumo específico de combustible indicado se puede calcular:

$$isfc = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}} \quad \text{Ecuación 24}$$

Ley de Faraday

La ley de Faraday es el comienzo vital de la electrólisis. Con la ecuación de esta ley se puede estimar la cantidad de metal que se ha corroído o depositado uniformemente sobre otro, a través de un proceso electroquímico durante cierto momento, y se expresa en los subsiguientes títulos: “

“La notación de cualquier elemento (radical o clan de elementos) liberada ya sea en el cátodo o en el ánodo durante la electrólisis, es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la solución”.

“Las cantidades de rudimentos o radicales diferentes librados por la misma cantidad de electricidad, son proporcionales a sus pesos equivalentes”

$$W = \frac{I * T * M}{n * F} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

W = Cantidad de metal que se ha corroído (g).

I= Corriente (A)

T= Tiempo en que dura el proceso (s)

M= masa atómica del metal $\left(\frac{g}{mol}\right)$

n= Valencia del metal

F= constante de Faraday $\left(\frac{A*s}{mol}\right)$

Ecuación del Gas Ideal

Un gas ideal es un éter hipotético cuya variante de presión, volumen y temperatura pueden describirse absolutamente con la ecuación nítida a partir de las leyes de Boyle Mariotte, de Charles Gay Lussac a presión constante y la denominada ley de Avogadro.

$$P * V = n * R * T$$

Ecuación

26

P = Presión

V= Volumen

n= Moles de gas

R= Constante universal de los gases ideales = 0,082L.atm/K.mol

T= Temperatura absoluta.

Relaciones de Masa, Masa Molar y Densidad de un Gas

La densidad es una magnitud que indica la masa que tiene un determinado volumen de sustancia; se calcula como el cociente entre ambas magnitudes ($\delta=m/V$).

Las densidades de los gases son en extremo bajas, generalmente se expresan en unidades de (G/l). Teniendo en cuenta que la demasía de moles de un gas puede calcularse como el

cociente entre la masa de sustancia y su masa molar, es exequible conectar las tres magnitudes en las ecuaciones legadas adonde M = masa molar, m = masa y δ = densidad del gas. (7)

$$P * V = n * R * T \quad \text{Ecuación 27}$$

$$P * V = \frac{m}{M} * R * T \quad \text{Ecuación 28}$$

Parámetros Termoquímicos de los Combustibles

Poder calorífico (Pc)

Se define como la cantidad de energía entregada en forma de calor al oxidante de un kilogramo, o un metro cúbico, de combustible para combustionar por completo.(F.Payri y J. M. Desantes s. f.)

El poder calorífico de los combustibles puede ser:

Poder Calorífico Superior (PCS)

Se obtiene cuando los productos y reactivos de combustión están en condiciones, ya que el agua ha condesado y ha cedido su calor latente de vaporización.(F.Payri y J. M. Desantes s. f.)

Poder Calorífico Inferior (PCI)

Se obtiene cuando el agua se conserva en estado gaseoso

En la siguiente tabla, se presenta los poderes caloríficos de combustibles típicos:

Tabla 1 Poderes caloríficos de Diferentes Combustibles

| Combustible | $PCS_V(kJ/kg)$ | $PCI_P(kJ/kg)$ | $PCI_P(kJ/Nm^3)$ (gases) | $PCI_P(kJ/l)$ (líquidos) |
|---------------------------|----------------|----------------|--------------------------|--------------------------|
| Metano | 55522 | 50032 | 35723 | |
| Propano | 50325 | 46334 | 90958 | |
| Butano | 49210 | 45277 | 117163 | |
| Metanol | 22884 | 20094 | | 15900 |
| Etanol | 29847 | 26952 | | 21276 |
| Butanol | 36020 | 33090 | | 26793 |
| MTBE | 37957 | 35108 | | 26155 |
| ETBE | 39247 | 36315 | | 27127 |
| DME | 31681 | 28882 | 59274 | |
| GLP | 50152 | 46607 | 104060 | |
| Gasolina | 46500 | 43400 | | 32442 |
| Gasoil | 45000 | 42400 | | 35298 |
| Fuel-óil | 42200 | 40500 | | 37867 |
| Biodiesel (FAME) | 40170 | 37530 | | 33026 |
| Fischer-Tropsch Diésel | 45471 | 43247 | | 33862 |
| n-Dodecano | 47764 | 44422 | | 33316 |
| Hidrógeno | 142180 | 120210 | 10727 | |
| Monóxido de carbono | 10110 | 10110 | 12630 | |

Propiedades Fisicoquímicas del Hidrógeno

Densidad (ρ)

Inflamabilidad

1.10.1 Densidad

La densidad representada (ρ) es la masa por unidad de volumen de fluido, la cual para el hidrógeno es el elemento más ligero de la tabla teórica con una densidad de $0.0899\text{kg}/\text{Nm}^3$

1.10.2 Inflamabilidad

Para cada carburante existen dos hitos de inflamabilidad el superior (Ls), el inferior (Li) los cuales son dependientes de la presión y la temperatura para que exista ignición debe estar comprendida entre los límites (Ls), (Li) hecho contrario no existe ignición.

El hidrógeno sin un elemento oxidante que lo acompañe no es explosivo, es una molécula estable, y a diferencia de otros combustibles, el hidrógeno necesita una fuente de ignición externa para que se genere la combustión para ello debe cumplir tres condiciones:

- Que el hidrógeno se mezcle con un oxidante
- Que dicha mezcla alcance los límites de inflamabilidad establecida para este gas
- Que exista una fuente de ignición que genere la combustión.

En la siguiente tabla se observa algunos límites de inflamabilidad en aire de varios combustibles a 20°C y 1 atm

Tabla 2 Límites de inflamabilidad de distintos combustibles con aire.

| Combustible | Relaciones másicas aire/combustible | | |
|-------------|-------------------------------------|--------|-------|
| | L_i | Esteq. | L_s |
| Metano | 34,4 | 17,3 | 10,3 |
| Metanol | 12,6 | 6,5 | 1,6 |
| Etanol | 18,5 | 9,0 | 2,7 |
| Propano | 30,7 | 15,7 | 5,9 |
| n-Octano | 26,5 | 15,1 | 7,7 |
| Isoctano | 31,9 | 15,1 | 4,0 |
| Gasolina | 18,2 | 14,6 | 3,1 |
| Hidrógeno | 348 | 34,5 | 4,8 |
| CO | 7,6 | 2,5 | 0,35 |
| Acetileno | 43,5 | 13,3 | 0,26 |

Fuente (F.Payri y J. M. Desantes s. f.)

1.10.3 Temperatura de inflamabilidad (“Flash point”)

Éste se define como la temperatura mínima a la cual el carburante desprende gases inflamables suficientes a la presión atmosférica, en otras palabras, que arden al aparecer en contacto con una fuente de calcinación, pero sin propagarse la ignición a la masa líquida del carburante. (Marc Fábrega Ramos 2008)

Si la temperatura del carburante se encuentra por abajo de su punto de inflamación, no será capaz de originar la masa autosuficiente de gases para quemarse, pues su proceso de

gasificación será demasiado lento. Siempre que un carburante se encuentre en o arriba de su punto de inflamación, los gases que desprende estarán presentes

La temperatura de inflamabilidad es siempre más baja que el punto de ebullición del carburante. Para el carburante que se encuentren en estado de gas en condiciones atmosféricas (como el hidrógeno, el metano y el propano), el punto de inflamación se encuentra muy por debajo de la temperatura del ambiente y tiene poco impacto, puesto que el combustible ya se encuentra totalmente vaporizado. (Marc Fábrega Ramos 2008)

En la siguiente tabla se muestra el punto de inflamación de algunos carburantes.

Tabla 3 Punto de inflamación de combustibles.

| Combustible | Punto de Inflamación |
|-------------|-------------------------|
| Hidrógeno | <-253°C |
| Metano | -188°C |
| Propano | -104°C |
| Gasolina | Aproximadamente a -43°C |
| Metanol | 11°C |

Fuente (Marc Fábrega Ramos 2008)

1.10.4 Rango de inflamabilidad

El rango de inflamabilidad de un éter se define como aquel escalafón alcanzado entre los límites superior e inferior de inflamabilidad del mismo. El umbral inferior de inflamabilidad de un butano es la mínima unión de ese gas que puede albergar una lumbre que se propaga al ser mezclada con el aire y encendida, para seguir quemando.

El umbral superior de inflamabilidad de un gas es la máxima concurrencia de ese butano que puede permitir una luminaria que se propaga posteriormente de haberse mezclado con el aire y haber sido encendida, para poder seguir quemando.

Una mezcla estequiometria ocurre cuando las moléculas del oxígeno y del hidrógeno están presentes en la masa necesaria exacta para mejorar la reacción de la ignición. Si hay más hidrógeno que oxígeno, la mezcla será rica, de modo que una parte del carburante no reacciona mientras tanto que todo el oxígeno será consumido. Si lo que tenemos es menor cantidad de hidrógeno que de oxígeno, la mezcla será pobre, de forma que se consumirá todo el carburante, sin embargo, no todo el oxígeno.

Una consecuencia del umbral superior de inflamabilidad es que el H₂ almacenado (yasea gaseoso o líquido) no será inflamable a causa de la falta de oxígeno en los cilindros. El combustible únicamente será inflamable en la periferia de alguna fuga, donde la mezcla del combustible con el aire alcance las proporciones adecuadas.

El hidrógeno es inflamable en una escala en gran medida amplia de uniones en el aire (4% - 75%) y resulta explosivo sobre una todavía amplia tonalidad de concentraciones (15% - 59%) en una temperatura atmosférica estándar. Tal y como se muestra en la subsiguiente figura, los términos de inflamabilidad aumentan con la temperatura. Como consecuencia, aun las reducidas fugas de hidrógeno corren el peligro de incendiarse o explotar. Si también nos encontramos en un perímetro cerrado, la fuga de hidrógeno puede enfrascarse, de tal estilo que se aumenta el peligro de quema y explosión. (Marc Fábrega Ramos 2008)

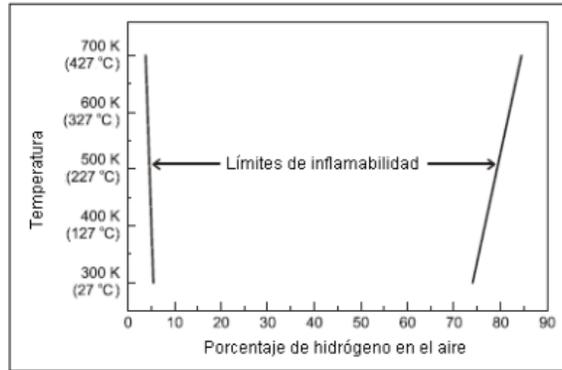


Ilustración 10 Rangos de inflamabilidad de diferentes combustibles a temperatura ambiente
(Fuente Marc Fábrega Ramos 2008)

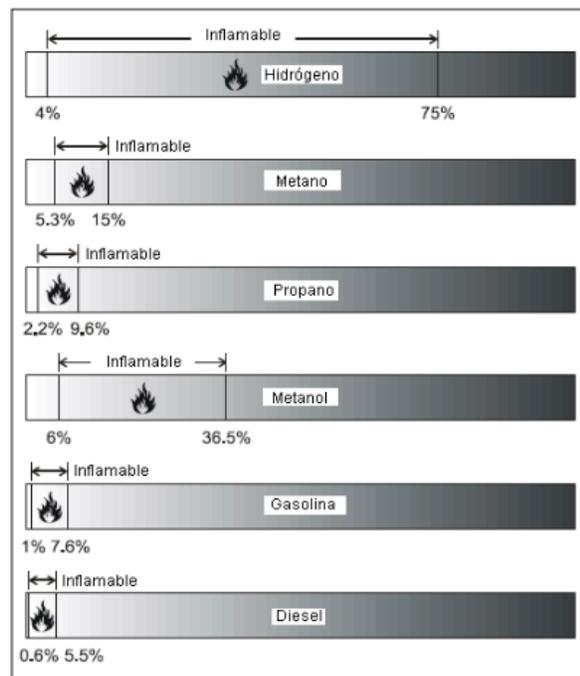


Ilustración 11 Rangos de inflamabilidad de diferentes combustibles a temperatura ambiente
(Fuente Marc Fábrega Ramos 2008)

1.10.5 Temperatura de autoencendido

Esta temperatura es la mínima necesaria para que inicie la ignición de una mezcla de carburante en carencia de fuente de ignición.

Para el hidrógeno, la temperatura de autoencendido es relativamente elevada (unos 585°C). Esto hace que sea imposible encender una aleación de aire/hidrógeno únicamente con calor, sin una fuente adicional de combustión (una chispa, por ejemplo)

A continuación, se ofrece una tabla en la que se muestra el valor de la temperatura de autoencendido de diversos combustibles. (Marc Fábrega Ramos 2008).

Tabla 4 Temperatura de Autoencendido

| Combustible | Temperatura de autoencendido |
|-------------|------------------------------|
| Hidrógeno | 585°C |
| Metano | 540°C |
| Propano | 490°C |
| Metanol | 385°C |
| Gasolina | Entre 230°C y 480°C |

Fuente (Marc Fábrega Ramos 2008)(F.Payri y J. M. Desantes s. f.)

1.10.6 Número de octano

La masa de octanos describe las características la resistencia de un carburante para demorar a generar la detonación o autoencendido en un motor de combustión interna. Los golpeteos o graneados son detonaciones secundarias, que ocurren posteriormente de la quema del carburante debido a la aglomeración de calor en ciertas superficies de la cámara de combustión. Cuando la temperatura particular excede de la temperatura de autoencendido ocurren estos golpeteos.

El hidrógeno posee un elevado número de octano elevado, con lo que reduce el riesgo a estas detonaciones descontroladas, aun cuando se realizan combustiones con mezclas muy pobres. (Marc Fábrega Ramos 2008)

A continuación, se muestra una tabla con el número de octano de diferentes combustibles.

Tabla 5 Cantidad de octanos en diferentes combustibles

| Combustible | Número de Octanos |
|-------------|-------------------|
| Hidrógeno | 130 |
| Metano | 125 |
| Propano | 105 |
| Octano | 100 |
| Gasolina | 87 |
| Diésel | 30 |

Fuente(Marc Fábrega Ramos 2008)

1.10.7 Energía de ignición

La fuerza de ignición es la cifra de energía externa que se debe atribuir para encender una combinación de carburante. Esta fuente externa debe ser mayor que la temperatura de autoencendido y demorar lo suficiente como para poder atizar el gas del carburante hasta su temperatura de calcinación. Los elementos más utilizados para provocar la ignición en motores de combustión interna son las bujías (chispas).

Aunque el hidrógeno tenga una temperatura más elevada de autoencendido que el metano, el propano o la gasolina, su energía de ignición de 0,02 mJ es mucho más baja y resulta por lo tanto más propenso a inflamarse.(Fábrega Ramos 2009)

1.10.8 Velocidad de quemado

La rapidez de quemado es la velocidad a la cual la lumbre viaja a través de la mezcla del gas combustible.

La rapidez de quemado es singular de la velocidad de llama. La rapidez de quemado indica la rigidez de una detonación pues las altas velocidades de quemado tienen una mejor orientación a favorecer la transición desde la deflagración hasta la detonación en largos túneles o tubos. La velocidad de llama es la adicción de la velocidad de quemado y la aceleración de desplazamiento de la mezcla del butano que no haya sido quemada.

La rapidez de quemado varía con la cantidad y gotas de gas a ambos extremos del rango de inflamabilidad. Tanto por debajo del umbral inferior de inflamabilidad como por encima del umbral superior de inflamabilidad, la rapidez de quemado es cero.

La velocidad de quemado del hidrógeno varía entre 2,65 m/s y 3,25 m/s. De este modo, una fuga de hidrógeno quemará rápidamente y, consecuentemente, su combustión tenderá a ser de breve duración. (Marc Fábrega Ramos 2008)

1.10.9 Distancia de apagado

La distancia de apagado describe las propiedades de agonía de la llama de un carburante cuando éste se usa en un motor de combustión interna. Concretamente, la longitud de apagado se refiere a la distancia a la que se apaga la llama tomando como mención la pared del cilindro, debido a las decadencias de calor.

La distancia de apagado del hidrógeno es de 0,064 cm., aproximadamente 3 veces menos que la distancia de apagado de otros combustibles como la gasolina. De este modo, las llamas que produce el hidrógeno al quemarse circulan más cerca de la pared del cilindro antes de

extinguirse, con lo que resultan más difíciles de apagar que las llamas que produce la gasolina. Esta menor distancia de apagado puede aumentar también la tendencia al petardeo, ya que la llama de una mezcla de aire/hidrógeno puede pasar más fácilmente cerca de una válvula entreabierta que en el caso de la combustión de una mezcla de aire/hidrocarburo. (Fábrega Ramos 2009)

1.10.10 Características de la llama

Las llamas de hidrógeno presentan un color azul muy claro y resultan casi invisibles a la luz del día debido a la ausencia de hollín. La visibilidad es realizada por la presencia de humedad o impurezas (tales como sulfuro) en el aire. En cambio, las llamas de hidrógeno son fácilmente visibles en la oscuridad o bien con luz artificial. Una combustión de hidrógeno puede ser indirectamente visible al observar la emanación de una especie de “ondulaciones” y la radiación termal, especialmente en los grandes fuegos

En muchas ocasiones, las escobas de maíz son utilizadas por los equipos de emergencia para detectar llamas de hidrógeno, puesto que éstas son prácticamente invisibles a la luz diurna. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de lo expuesto anteriormente. (Fábrega Ramos 2009)

1.10.11 Reactividad

Es una de las propiedades de todos los carburantes químicos. En cuales, se produce una hipersensibilidad química cuando las moléculas de carburante forman enlaces con el oxígeno, las moléculas que han reaccionado dispondrán de menor energía que cuando se encontraban en su estado preliminar, sin reaccionar.

Cuando las moléculas reaccionan, el altibajo rendido en el estado de su energía va compartido de una cesión de energía que podremos rendir para elaborar trabajo útil.

La cesión de energía es análoga a lo que ocurre cuando el agua fluye de un alto escalón hasta un nivel inferior. Cuando se encuentra en el alto nivel dispone de una cierta energía potencial, que disminuye a medida que disminuye de la misma manera el nivel del agua.

Las hipersensibilidades químicas que se producen requieren una cierta masa de energía de activación.

Cuando se proporciona una masa pequeña de energía de activación a una mezcla de hidrógeno y oxígeno, por ejemplo, en fase de chispa, las moléculas reaccionan de forma potente, lanzando una masa considerable de calor, y obteniendo agua como producto final. La formación de agua a través de la alergia de hidrógeno y oxígeno es reversible, en otras palabras, que, si disponemos de agua en un estado de baja energía, si aplicamos una cierta porción de energía podremos conseguir hidrógeno y oxígeno. Éste es el origen en el que se basa la elaboración de hidrógeno a través de electrólisis del agua.

En términos de reducción de la contaminación, el hidrógeno se convierte en un combustible casi ideal, ya que no contiene elementos carbonosos o sulfurosos, con lo que no se producirá CO, CO₂, SO_x ni hollín durante su combustión. (Marc Fábrega Ramos 2008)

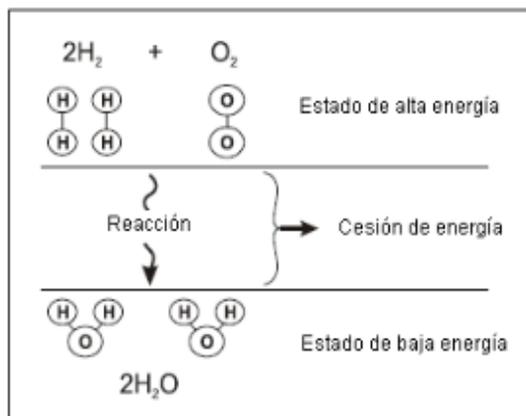


Ilustración 12 Estados de la energía Química
(Fuente Marc Fábrega Ramos 2008)

1.10.12 Energía

Densidad de la energía.

La densidad de energía informa de la masa de energía que hay en un cierto volumen de carburante. Así, la densidad de energía es el producto del contenido en energía (Lhv) y de la densidad de un carburante determinado. La densidad de la energía es en verdad una medida que nos informa sobre lo compactados que se encuentran los átomos de hidrógeno en un carburante.

La densidad de la energía del hidrógeno es bastante pobre (ya que este elemento dispone de una densidad muy baja), aunque su relación peso – energía es la mejor de todos los combustibles, precisamente al ser tan ligero. (Marc Fábrega Ramos 2008)

En la siguiente tabla, se ofrece una comparativa de la densidad de la energía en varios combustibles.

Tabla 6 Comparación de la densidad de la energía

| Combustible | Densidad de la energía (LHV) | Unidad | Estado | Presión | °C |
|-------------|------------------------------|------------------------|---------|-----------------------|----|
| | 10050 | kJ/m^3 | Gaseoso | 1 atm | 15 |
| Hidrógeno | 1825000 | kJ/m^3 | Gaseoso | 200 bar_g | 15 |
| | 4500000 | kJ/m^3 | Gaseoso | 690 bar_g | 15 |
| | 8491000 | kJ/m^3 | Líquido | | |
| Metano | 32560 | kJ/m^3 | Gaseoso | 1 atm | 15 |
| | 6860300 | kJ/m^3 | Gaseoso | 690 bar_g | 15 |
| Propano | 20920400 | kJ/m^3 | Líquido | 1 atm | 15 |
| | 86670 | kJ/m^3 | Gaseoso | | |
| Gasolina | 23488800 | kJ/m^3 | Líquido | | |
| | 3115000 | kJ/m^3 | Líquido | | |
| Diésel | 31435800 | kJ/m^3 | Líquido | | |
| Metanol | 15800100 | kJ/m^3 | Líquido | | |

Fuente (Marc Fábrega Ramos 2008)

1.11 Producción de Hidrógeno.

En la de obtención de hidrógeno existen destinadas opciones de producción de hidrógeno mediante energías renovables, principalmente mediante la electrólisis del agua, pero siempre al llevar a cabo otros mecanismos basados en procesos biológicos y revalorización de residuos. El gran desafío, es obtener sistemas optimizados frente a la evolución con fuentes de gran movilidad, como las renovables, sin que parámetros como la pureza de los gases

producidos, la eficiencia del sistema o la durabilidad se vean perjudicados. La electrólisis es un proceso que consta en aportar electricidad y calor elementales (H_2 y O_2). Por lo cual otros métodos que consisten en procesos foto químicos y biológicos, como la fermentación anaeróbica de residuos. (Amores E y Sánchez M 2020).

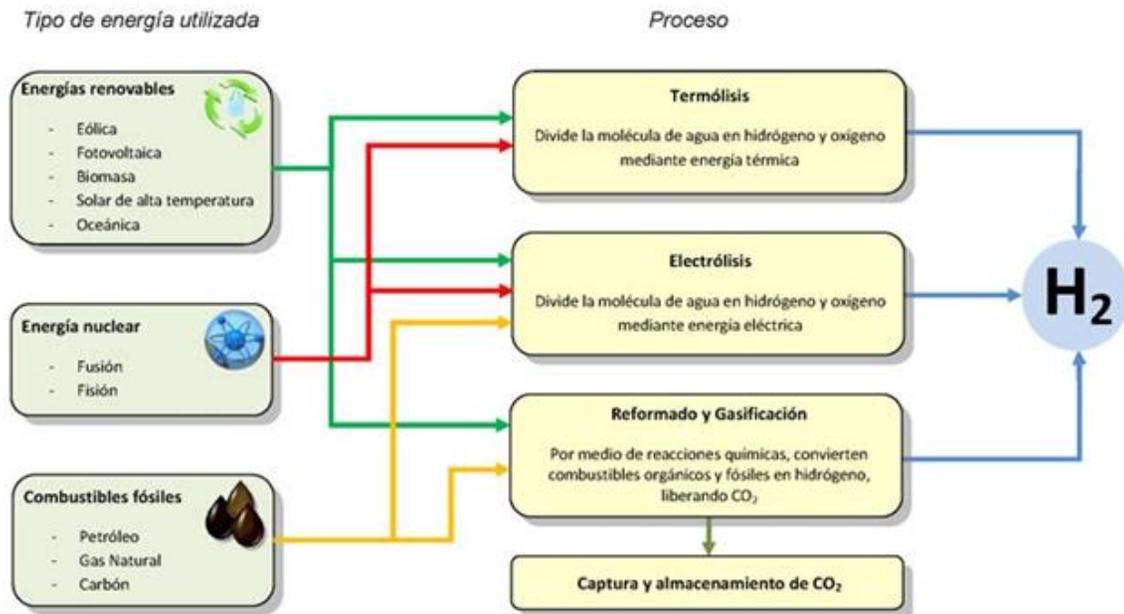


Ilustración 13 Formas de obtener hidrógeno

(Fuente Amores E y Sánchez M 2020)

1.11.1 Termólisis

La termólisis es el recurso en el cual se eleva la temperatura del agua por sobre los 2.227 °C, para cortar los enlaces de la molécula H_2O . Por esta causa se lleva a cabo cuando el agua entra en contacto con una superficie a alta temperatura y la fuerza calórica provoca la disociación en oxígeno e hidrógeno molecular, los cuales deben ser separados velozmente, obligado a que la hipersensibilidad es reversible y provoca fuertes detonaciones (S. Z. Baykara, 2004).

1.11.2 Reformado de gas natural

Las materias primas más utilizadas para su producción en este proceso industrial son el agua y el gas natural, el gas de refinería como el metano, propano, etc. Este es el método más empleado a escala industrial (“steam reforming”) del gas natural y del gas de refinería, ocupando alrededor de 48% de la producción total, otras basadas en los hidrocarburos el 30% en el carbón 18% y en la electrólisis el 4% [datos obtenidos del documento “Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica” de la universidad de Sevilla] conforme a las reacciones:

Estas reacciones se llevan a cabo simultáneo y consecutivamente en uno o varios reactores, por lo que el gas producido consiste en una mezcla de H_2 , CO y CO_2 , además de vapor de agua, algo de CH, sin reaccionar. A este conjunto de gases de reacción se le conoce como gas de síntesis. Las reacciones cuyas fórmulas aparecen arriba son fuertemente endotérmicas es decir que necesitan gran cantidad de calor para llevarse a cabo por lo que se realizan en fase gas a altas temperaturas, arriba de 8000 °C que son inyectados a la mezcla,

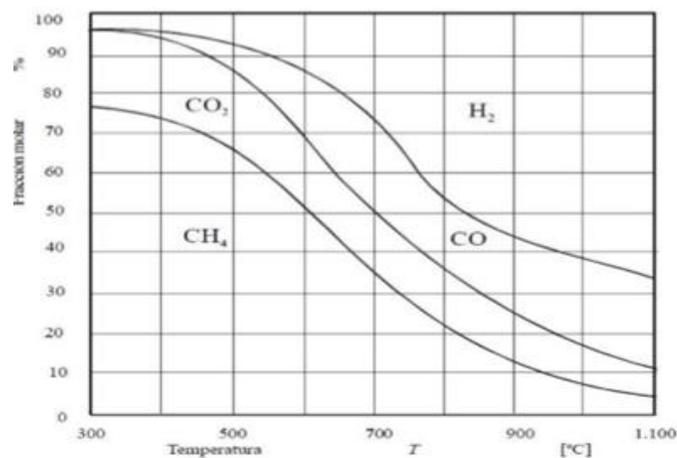


Ilustración 14 Componentes del gas de síntesis

(Fuente Marc Fábrega Ramos 2008)

procurando la máxima conversión de metano, como se puede observar en el diagrama siguiente:

Para aumentar la rapidez de reacción se usan catalizadores de níquel para mejorar la producción de hidrógeno a costa del CO presente en el gas reformado se completa a continuación la “shift- conversión” en otro reactor separado, a temperaturas del orden de 5000 °C, con catalizadores de óxidos de hierro y cromo o a menores temperaturas con catalizadores de zinc/cobre. Para producir un volumen elevado de hidrógeno, esta se efectúa a presión de 28 a 36 bares para evitar comprimir el hidrógeno producido.(Aguirre Guevara 2013:10)

1.11.3 Gasificación

La evaporación del carbón y de fracciones sosas del oro negro es un proceso que consiste en la calcinación con ausencia de oxígeno en la que se obtiene monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano en diversas masas según la composición de la materia prima y las condiciones en que se lleva a cabo el proceso. La temperatura se mantiene entre 700 y 1500°C. La evaporación puede aplicarse tanto a la biomasa como al carbón. Cuando se introduce aire en la reacción se obtiene un butano pobre, por ejemplo, en el caso del carbón o coque contiene entre 25% y 30% de monóxido de carbono, entre el 65% y el 70% de nitrógeno y en menor cantidad oxígeno y dióxido de carbono. Para conseguir hidrógeno es indispensable enfrascarse una reacción de desplazamiento sobre el gas anteriormente mencionado. Ahora si lo que se agrega a la reacción es oxígeno y éter de agua lo que se obtiene es un gas de síntesis que contiene hidrógeno y monóxido de carbono y este butano puede ser utilizado para para producir el propio hidrógeno y además carburantes líquidos

como lo es el CH₃OH. Por lo que es una mejor alternativa, luego más valiosa rendir oxígeno y fluido de líquido en la hipersensibilidad. En la subsiguiente figura se muestra un apunte elemental del progreso de evaporación. Una ocasión purificada de reparados de azufre y cenizas, el vapor obtenido seguidamente del proceso de volatilización se somete a una reacción de desplazamiento dando como resultado una aleación de hidrógeno y dióxido de carbono. Al final del proceso el hidrógeno y el dióxido de carbono se dividen y para conseguir solo el hidrógeno en agrupaciones de 99.99%.

1.11.4 Electrólisis

Electrólisis es el proceso donde se emplea una determinada cantidad de energía eléctrica haciéndola pasar a través de una sustancia en solución o fundida ocasionando en ella cambios químicos. La electrólisis se lleva a cabo en un dispositivo conocido como celda electrolítica. (H. A. Apez González, J. T. Cruz García y J. A. Navarrete Negrete 2010)

Las celdas electrolíticas están conformadas por un recipiente; el cual retiene al electrolito y debe ser de un material que no reaccione con éste, dos electrodos (uno funciona como cátodo y el otro como ánodo) quienes permiten el paso de la corriente eléctrica. Una fuente de voltaje y un amperímetro. (H. A. Apez González, J. T. Cruz García y J. A. Navarrete Negrete 2010)

Una celda electrolítica está constituida de un líquido con capacidades conductoras llamado electrolítico además de dos electrodos de composición similar. La celda no sirve como fuente de energía eléctrica, pero puede conducir corriente desde una fuente externa llamada acción electrolítica. Se utiliza un electro deposición, electro formación, producción de gases y realización de muchos procedimientos industriales, un ejemplo es la refinación de metales.

Si debido al flujo de la corriente los electrodos se tornan desiguales, es posible que ocurra una acción voltaica. (H. A. Apez González, J. T. Cruz García y J. A. Navarrete Negrete 2010)

La descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno es alcanzada mediante la circulación de corriente eléctrica a través de los electrodos separados por un electrolito con buena conductividad iónica. La reacción total para la separación del agua es la siguiente:(Alejandro Pineda 2009)

Para que la reacción se lleve a cabo, debe ser aplicado sobre los electrodos un cierto voltaje, el cual puede ser demostrado por medio de la energía libre de Gibbs para la ruptura de la molécula de agua. (Alejandro Pineda 2009)

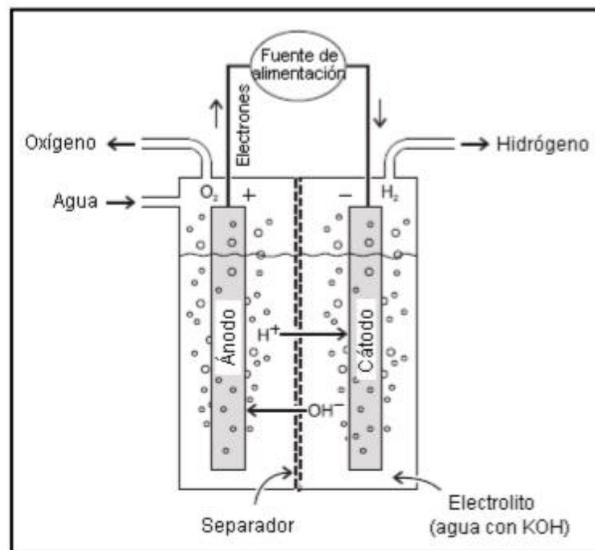


Ilustración 15 Celda Electrolítica.

(Fuente Marc Fábrega Ramos 2008)

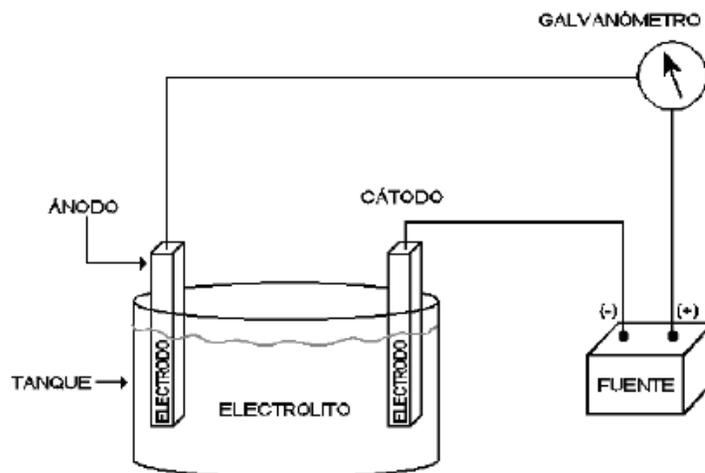
El átomo de oxígeno, que es en extremo reactivo, se adhiere al metal del ánodo y se combina con otro átomo de oxígeno que además se ha unido al metal, formando una molécula de oxígeno, que se desprende del metal del ánodo en forma de vapor.

El índice de generación de hidrógeno se relaciona con la densidad de corriente (cantidad de corriente partida por el área del electrodo, medida en amperios por área). Generalmente

cuanto más alta es la densidad de corriente, mayor es el voltaje requerido de la fuente de alimentación, y por tanto mayor será el costo de fuerza por unidad de hidrógeno. No obstante, valores destacados de voltaje disminuyen el volumen de la cuba electrolítica y por ende dan motivo a un importe menor de la plaza. Las cubas electrolíticas avanzadas son fiables, con provechos energéticos entre 65% y 80% y funcionan con densidades de corriente cerca de 2000 A/m²

La brazada de energía eléctrica exigida para la electrólisis del agua puede compensarse poco agregando fuerza térmica a la hipersensibilidad. La cifra mínima de voltaje adeudada para romper el agua es de 1,23 V a 25°C. A este voltaje, la alergía requiere fuerza térmica del exterior para producirse. A 1,47 V y la misma temperatura que en el acontecimiento anterior, no se requiere ninguna cantidad de calor aportada.

El funcionamiento de la cuba electrolítica a ebulliciones bajas con fervor agregado es más recomendable, pues la energía térmica es generalmente más permuta que la electricidad, y se puede recircular en el interior del sumario. Además, la fuerza del electrólisis aumenta a medida que se aumenta la temperatura de funcionamiento. (Fábrega Ramos 2009)



*Ilustración 16 Elementos que Forman parte del proceso de la electrólisis
(Fuente M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez. 2008)*

1.12 Historia de la Celda Electrolítica

Las celdas de carburante son mecanismos electroquímicos que a través de una reacción química transforman el carburante y un oxidante, en electricidad y calor. A diferencia de las pilas convencionales almacenadoras, que dependen de la masa de reactivos contenidos en ellas, las pilas de carburante necesitan de un depósito permanente para incubar intensidad eléctrica, por lo que son competentes de producir energía eléctrica de manera consecuente, mientras tanto no se agote el suministro de carburante y oxidante, está formada por dos electrodos: en el ánodo se encuentra el carburante y en el cátodo está el oxidante, y entre estos electrodos se encuentra una membrana que obliga a los electrones a correr por el ánodo hacia el cátodo. La celda de carburante está compuesta por dos electrodos adentro de un electrolito, adonde el ánodo es alimentado por el hidrógeno o carburante y el cátodo por el oxígeno u oxidante. Un fermento separa los electrones de la molécula de hidrógeno, por lo que el hidrógeno ionizado pasa por una membrana a través del electrolito y los electrones se mueven al ánodo combinándolo con el oxígeno y el hidrógeno formando agua. Las celdas de carburante se pueden empalmar en serie para elevar el voltaje deseado, así se crea lo que se denomina una pila (stack) o celda de carburante. El fenómeno de celdas de carburante fue descubierto por el abogado Galés William Grove en 1839, unos años posteriormente de que Michel Faraday descubriera las leyes de la electrólisis. Grove demostró que era viable producir acción eléctrica y agua haciendo burbujear H_2 y O_2 en agua y obtener actividad eléctrica en este proceso. Así publicó un documento en el que describía una celda de carburante en formación por un conjunto de pares de electrodos de platino sumergidos en ácido, Grove llamó a este artefacto “pila de gas” y momento más tarde se llamó “pila de combustible”.

La ciencia de materiales no estaba muy desarrollada en esa época y no se le dio continuidad a ese descubrimiento.

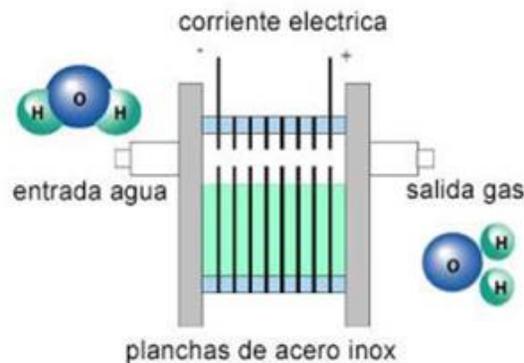


Ilustración 17 Celda de Hidrógeno

(Fuente E. Red 2012)

Pero casi un siglo después, Francis T Bacon desarrolló una celda de combustible utilizando electrolizadores de platino y solución alcalina como medio conductor, está producía una potencia de 1Kw. Lo anterior sirvió a General Electric quien desarrolló una celda de combustible alimentada por hidrógeno que se utilizó en el módulo espacial Gemini el cual llevó al primer hombre a la luna en la década de los 60. Este primer desarrollo fue seguido por el programa espacial Apolo, el cual empleó pilas de combustible para generar electricidad empleada(Aguirre Guevara 2013).

Para el uso diario, estas pilas fueron desarrolladas por Pratt y Whitney, basados en la licencia tomada sobre la patente de Francis T Bacon, pero aún eran muy costosas y pesadas además de ocupar un gran volumen (Aguirre Guevara 2013).

La pila utilizada en el Apolo podría generar una potencia de hasta 12 KW, pesaba 120 Kg y medía 36x38x14cm. El cilindro blanco en la imagen de la derecha contiene la pila de combustible, compuesta por 32 celdas conectadas en serie, mientras que el resto son los sistemas auxiliares (control electrónico y bombas de presión). Cada mono celda podía trabajar a un voltaje de 0.875V. A finales de la década de 1960 General Motors fue la primera

compañía que incorpora una celda de combustible desarrollada por Unión Carbide a una furgoneta (combi) pero la celda era tan pesada y voluminosa que del auto de 6 asientos solo se podían utilizar 2 y el platino utilizado costaba tanto como una flota de camionetas. Después de esto no se tomaron en cuenta las pilas de combustible hasta la década de los noventa, donde se utilizaba más de ½ kilo de platino para la pila de combustible que costaba 8000 dólares. A partir de este momento se probaron sistemas de pilas de combustible en todo tipo de aplicaciones, como autos, submarinos, residencias, etc. y en forma paralela también se desarrolló la tecnología, se obtuvieron láminas delgadas de platino más pequeñas que el grosor de un cabello humano y se utilizaron menos de 60 gramos de platino en el modelo equinox de Chevrolet (Aguirre Guevara 2013).

El año pasado (2012) en la UNED (Universidad Nacional de Educación a Distancia) de España, se publicó que se había obtenido una carga de $0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ de platino, pudiendo obtener $10\text{Kw}/\text{g}$ de platino. Este se presume, es un gran logro ya que el departamento de energía de los estados unidos había impuesto como meta, que entre 2017 y 2020 se obtuvieron cargas de hasta $0.125\text{mg}/\text{cm}^2$ y producir una potencia de $8\text{Kw}/\text{g}$, este resultado ha sido patentado por los investigadores como el método de deposición de capas delgadas y nano estructuras de electro catalizador (platino), sobre los electrodos las cuales se unen por simple contacto a los dos lados de la membrana polimérica, a este método también se le ha llamado “electrospray” lo cual aumenta de manera considerable el rendimiento de la pila. Según explica uno de los investigadores del departamento de física matemática y de fluidos de la UNED, José Luis Castillo han logrado controlar las propiedades como la porosidad y rugosidad del material generado por las partículas cuando se depositan, aumentando favorablemente la superficie activa, ya que según explica el rendimiento de la celda depende

de la superficie del catalizador que esté en contacto con el gas de reacción y ellos han logrado agrandar esta superficie activa alcanzando así un mayor rendimiento. Además de lo anterior mencionado este procedimiento tiene la facilidad de ser escalado es decir que estos elementos de las celdas de combustible pueden producirse a distintos tamaños y escalas de manera industrial y un bajo coste, ya que el precio del catalizador equivale a más del 30% del total de la celda de combustible (Aguirre Guevara 2013).

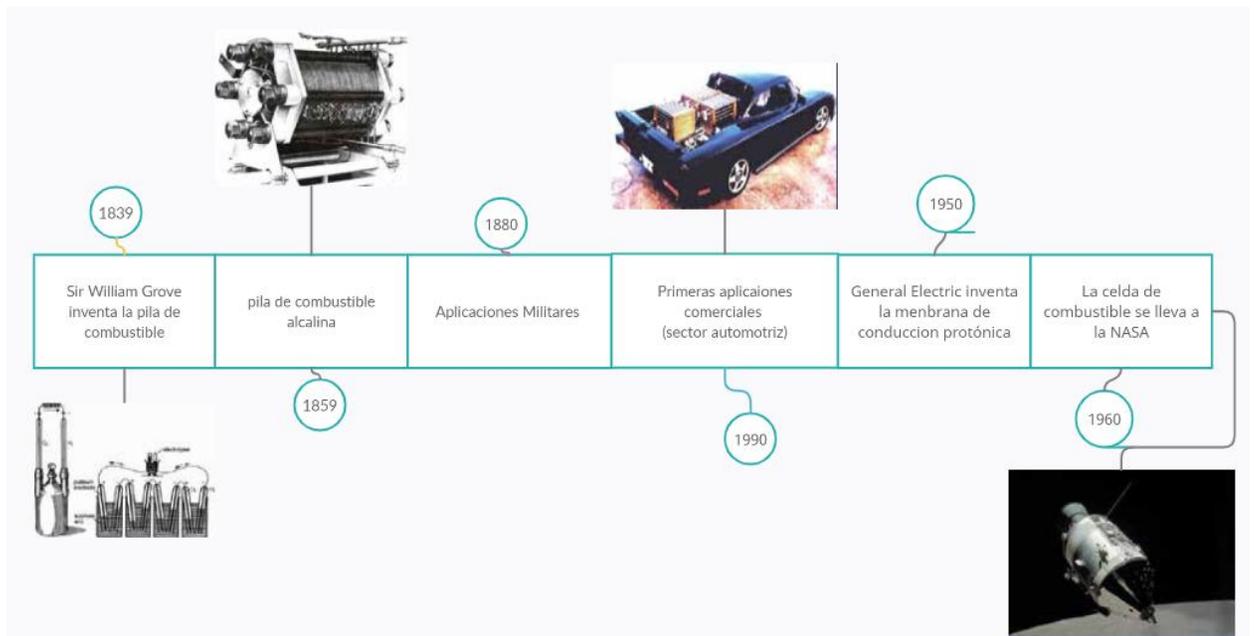


Ilustración 18 Historia de Celda de Combustible

(Fuente Autores)

1.13 Tipos de Celdas Electrolíticas

Una fuente de poder eléctrica es conectada a dos electrodos hechos de algún metal inerte como el platino o aceros inoxidables, los cuales son puestos en el agua. En una celda propiamente diseñada, el hidrógeno aparecerá en el cátodo (el electrodo negativamente cargado, adonde los electrones son bombeados al agua), y el oxígeno aparecerá en el ánodo (el electrodo positivamente cargado). La cantidad de hidrógeno incubado es el doble que la

de oxígeno, y entre ambas son proporcionales al total de carga eléctrica que fue legada por el agua.

En la industria automotriz existe dos tipos de celdas (húmedas y secas) para conseguir las electrólisis conocidas como celdas electrolíticas, las cuales se fabrican en acero inoxidable.

1.13.1 Celdas húmedas de hidrógeno

Es un tipo de celda que consta de electrolito líquido que fluye con soltura, por lo que en sus terminales de la pila están conectados con la carga provocando una hipersensibilidad química entre el electrolito, el plomo y el óxido de plomo. Esta hipersensibilidad química provoca el derramamiento de electricidad a la carga a través de terminales que incluso conducen a la anulación del ácido sulfúrico de la posibilidad que se refuerza a las placas. Son las más sencillas de machihembrar, pero poco capaces. Estas celdas están formadas por láminas de acero y por aislantes de plástico. De este tipo incluso existen en helicoidal de acero. se puede ver este tipo de celda.

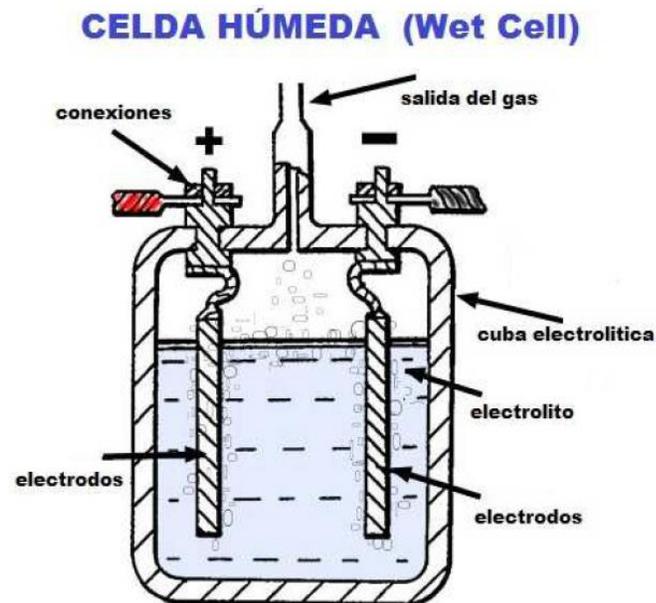


Ilustración 19 Celdas Húmedas de Hidrógeno.)

(Fuente Héctor Holgado Secas 2012)

1.13.2 Celdas secas de hidrógeno.

Estas celdas son un diseño y prototipo más eficiente, fácil de usar que una celda sumergida o húmeda la cual se caracteriza por que la misma celda es el contenedor. El agua transita en el interior de la celda seca y sale convertida en gas hidrógeno y oxígeno. Estas celdas son recomendadas para construir por ser más eficientes.

Funcionamiento

Para poner en marcha el generador básicamente utiliza agua destilada y una corriente de 12V DC ya sea de una batería o de una fuente rectificadora; a través del transcurso de la electrólisis, el generador entrega por separado el oxígeno y el hidrógeno, siendo enviado el gas de hidrógeno al ingreso de aire del motor donde se va a fusionar con la mezcla estequiometría y seguidamente a combustión el motor ya con la mezcla.

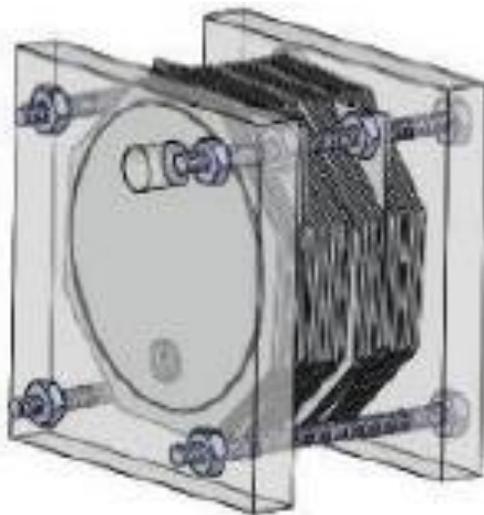


Ilustración 20 Generador de Celda Seca

(Fuente Karla Margarita López Pérez 2018)

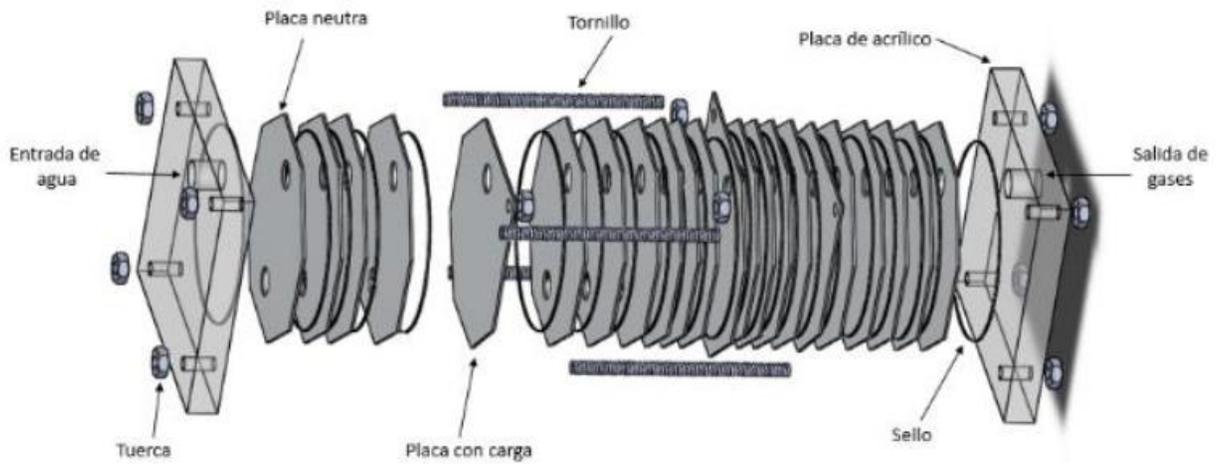


Ilustración 21 Celdas Secas de Hidrógeno

(Fuente Karla Margarita López Pérez 2018)

Las placas pueden ir conectadas al polo positivo al negativo o a ninguno siendo neutra. Existen distintas configuraciones dependiendo del número de celdas (E. Red 2012).

CAPÍTULO II.

DISEÑO DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO DE CELDA SECA MEDIANTE CAD PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL MOTOR 4 TIEMPOS DE 150 CC A GASOLINA.”

2.1 Introducción

En el capítulo II se dimensionará, diseñará y construirá los elementos del generador de hidrógeno de celda seca así entendiendo el funcionamiento de cada elemento. Además, se implementará en un vehículo de combustión interna para reducir la emanación de gases contaminantes hacia la atmosfera.

2.2 Criterios de Diseño

Flujo Másico

Producción de Gas (H)

2.2.1 Flujo másico del aire

Se define como la cantidad de un fluido que circula por una sección de área determinada por unidad de tiempo, se representa con la letra m y se calcula por medio de la ecuación 3.

Donde:

\dot{m} =flujo másico

ρ = densidad del fluido

V_t = Cilindrada total del motor

η =régimen de giro del motor

i = número de ciclo de motor

Para encontrar el gasto másico de combustible en función a la altitud que se encuentra Cuenca 2560 msnm y se utiliza la siguiente tabla 7:

Tabla 7 Presión atmosférica dependiendo de la altura.

| Altura | Temperatura | Presión | | Densidad |
|--------|-------------|---------|-------|----------------------|
| (m) | (K) | (mmHg) | Bar | (Kg/m ³) |
| 0 | 288 | 760 | 1,013 | 1,225 |
| 200 | 286,8 | 742 | 0,989 | 1,202 |
| 400 | 285,4 | 725 | 0,966 | 1,179 |
| 600 | 284,4 | 707 | 0,942 | 1,156 |
| 800 | 282,9 | 690 | 0,920 | 1,134 |
| 1000 | 281,6 | 674 | 0,898 | 1,112 |
| 1400 | 279 | 642 | 0,856 | 1,070 |
| 1600 | 277,7 | 626 | 0,834 | 1,048 |
| 2000 | 275,1 | 596 | 0,794 | 1,007 |
| 2200 | 273,8 | 582 | 0,776 | 0,987 |
| 2400 | 272,5 | 567 | 0,756 | 0,967 |
| 2600 | 271,2 | 553 | 0,737 | 0,947 |
| 2800 | 269,9 | 539 | 0,718 | 0,928 |
| 3000 | 268,6 | 526 | 0,701 | 0,909 |

Fuente Termodinámica (Yunes A Cengel y Michael A. Boles 2011)

$$\dot{m} = 0,947 \text{Kg/m}^3 * 0.000150 \text{m}^3 * 8000 \frac{\text{RPM}}{\text{S}} * 0.5$$

$$\dot{m} = 0.056820 \text{Kg/s}$$

Para encontrar la masa de combustible en este caso de hidrógeno según las revoluciones del motor aplicamos la ecuación 4

$$m_{tf} = \frac{0.056820 \text{ Kg/s}}{15.06}$$

$$m_{tf} = 3.7729 \times 10^{-3} \text{ Kg}$$

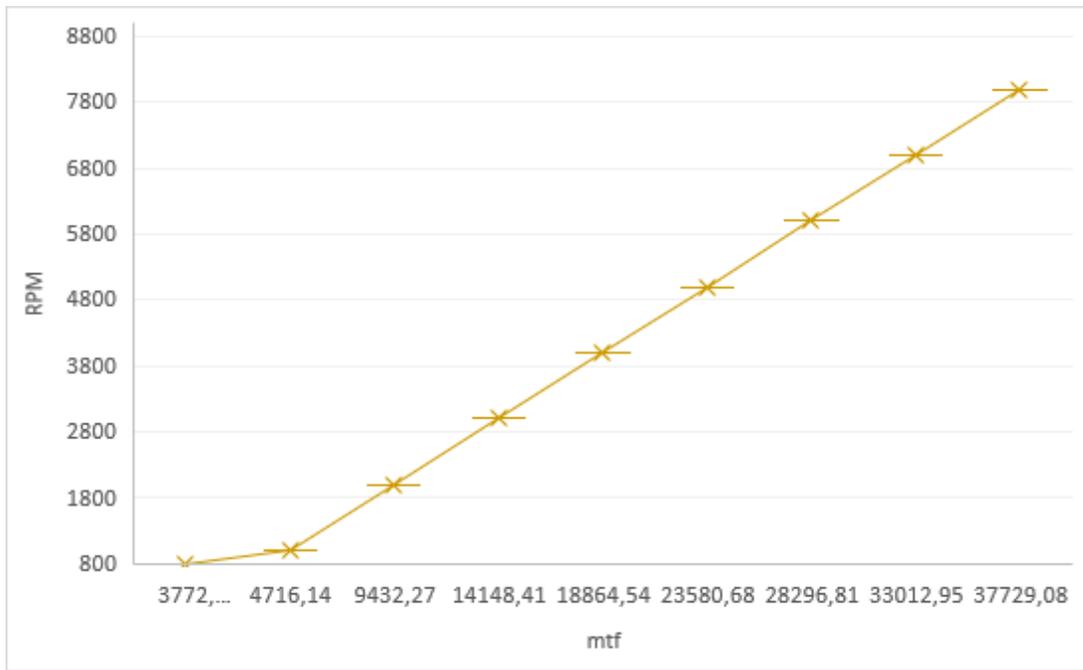


Ilustración 22 Cantidad de masa de combustible según las revoluciones del motor Fuente: Autores

2.2.1 Cálculos de producción de gas

Es necesario establecer o determinar la nomenclatura que se utilizara para desarrollar dichos cálculos, se detallan a continuación.

e = espesor de la celda(cm)

n = número de celdas

x = ancho de la celda (cm)

$h = \text{altura de la celda}(cm)$

$V_c = \text{volumen de la celda}$

$VT_c = \text{volumen total de las celdas}$

$A = \text{área de la placa}(cm^3)$

$A_t = \text{área total de la placa}(cm^2)$

$A_e = \text{Amperaje consumido por el electrolito}(Amp)$

$C = \text{conductividad del electrolito}$

$A_c = \text{Amperios consumidos por el generador}(Amp)$

$t = \text{tiempo que dura el paso de corriente}(min)$

$PH = \text{Peso de hidrógeno}(g)$

$PO = \text{Peso del oxígeno}(g)$

$Dh = \text{Densidad del hidrógeno}$

$Do = \text{Densidad del oxígeno}$

$K = \text{constante}$

$P_aH = \text{Peso atómico del hidrógeno}$

$P_aO = \text{Peso atómico del oxígeno}$

Para realizar los cálculos de producción del gas tomamos en cuenta:

- El dimensionamiento de las placas (positivo negativo neutro).
- Conductividad del electrolito
- Volumen de hidrógeno desprendido de las celdas
- Además, para el cálculo de volumen de los gases generados tenemos los siguientes datos:

Tabla 8 Producción de gas

| Descripción | Magnitud |
|------------------------------------|---|
| Gas generado | Tiempo 1 min |
| Intensidad de corriente | 10 amperios |
| Condiciones de presión atmosférica | 0,8860597089 atm (1atm) y a 25°C |
| Electrólito | Agua desmineralizada junto con el hidróxido de sodio o de potasio (NaOH o KOH). |
| Concentración NaOH o KOH | 5% |

Datos Generales de la producción de gas (Fuente Elaboración Propia)

Dimensionamiento de las placas:

$$x = 18\text{cm}$$

$$h = 18\text{cm}$$

$$e = 0,3\text{cm}$$

$$n = 13$$

Volumen de la celda

$$V_c = x * h * e \quad \text{Ecuación 29}$$

$$V_c = 18 * 18 * 0.3$$

$$V_c = 97,2 \text{ cm}^3$$

Volumen total de las celdas

$$VT_c = (V_c * n) \quad \text{Ecuación}$$

308

$$VT_c = (97,2 * 13)$$

$$VT_c = 1263.6 \text{ cm}^3$$

Área de la placa

$$A = x * h \quad \text{Ecuación 31}$$

$$A = 324 \text{ cm}^2$$

Área total de la placa

$$At = (A * n) \quad \text{Ecuación 32}$$

$$At = (324 * 13)$$

$$At = 4212 \text{ cm}^2$$

Conductividad del electrolito

$$C = \frac{Ae * e}{V * At} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$C = \frac{2.01(A) * 0,3(\text{cm})}{12(V) * 4212 (\text{cm}^2)}$$

$$C = 0,0000119 \text{ Siemens/cm}$$

Cálculo de la contante (K)

$$K = \frac{Ac * 60 * t}{96500} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$K = \frac{15 * 60 * 1}{96500}$$

$$K = 0,0093264$$

Cálculo del volumen de hidrógeno desprendido por las celdas

$$PH = P_aH * K \quad \text{Ecuación 35}$$

$$PH = 1,00794 * 0,0093264 = 0,00940477\text{g}$$

$$VH = \frac{PH}{Dh * n} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$VH = \frac{0,00940477\text{g}}{0,0000838\text{g/cm}^3 * 13}$$

$$VH = 1458,23\text{cm}^3$$

$$VH = \frac{1458,23\text{cm}^3}{1 \text{ min}} * \frac{1\text{l}}{1000\text{cm}^3}$$

$$VH = 1,4582 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Cálculo del volumen de oxígeno desprendido por las celdas

$$P_O = P_a O * K \quad \text{Ecuación 37}$$

$$P_O = 15,9994g * 0,0093264 = 0,149217202g$$

$$V_O = \frac{P_O}{D_o * n} \quad \text{Ecuación 38}$$

$$V_O = \frac{0,149217202g}{0,0000793 * 13}$$

$$V_O = 24,45901\text{cm}^3$$

$$V_O = \frac{24,45901\text{cm}^3}{1 \text{ min}} * \frac{1l}{1000\text{cm}^3}$$

$$V_O = 24.45901 \text{ l/min}$$

Volumen total de H₂O desprendido en forma de gas de la celda

$$V_{H_2O} = V_H + V_O \quad \text{Ecuación 39}$$

$$V_{H_2O} = 1,4582 \frac{l}{\text{min}} + 24.45901 \frac{l}{\text{min}}$$

$$V_{H_2O} = 25,9172 \frac{l}{\text{min}}$$

Análisis Matemático

Para calcular el número de coulomb que pasan a través de la celda nos basamos en la fórmula siguiente:

$$Q = I * t \quad \text{Ecuación 40}$$

$$Q = 10A * 60\text{seg}$$

$$Q = 600A * seg * \frac{1C}{1A * seg} = 600C$$

Convertimos el número de coulomb a número de moles de electrones.

$$600C * \frac{1mol e^-}{96500C} = 6,217 \times 10^{-3} mol e^-$$

Para calcular el número de moles de H_2 generado:

$$600C * \frac{55,55mol e^-}{96500C} * \frac{1mol H_2}{2mol e^-} = 0,1726mol H_2$$

El volumen de 0,003109 moles de H_2 está dado por:

$$V = \frac{nRT}{P}$$

Ecuación 41

$$V_H = \frac{(0,17268 mol) * (0,0821 \frac{L * atm}{K * mol})(273 K)}{1 atm}$$

$$V_H = 0,95 L$$

Para calcular el número de moles de O_2 generado:

$$0,006218 mol e^- * \frac{27,77 mol O_2}{4 mol e^-} = 0,0431mol O_2$$

Volumen de 0,001555 moles de O_2 está dado por:

$$V = \frac{nRT}{P}$$

Ecuación 42

$$V = \frac{(0,0431) * (0,0821 \frac{L * atm}{K * mol})(273K)}{1 atm}$$

$$V = 0,475 L$$

Diseño

El generador de H₂ es de tipo celda seca; está constituido de los siguientes elementos dos placas de acrílico (tapas) en los extremos y entre dichas tapas se encuentran placas de acero inoxidable las mismas que hacen de electrodos se encuentran separadas por empaques de goma.

Las tapas están constituidas de acrílico de 4 mm de espesor dado que el acrílico es un material aislante no conductor de electricidad.

Los electrodos, son de material conductor acero inoxidable (304) por su costo relativamente bajo y sus propiedades conductivas y anticorrosivas.

Los empaques son de material elástico y no conductor (goma EPDM de alta densidad) dado que su función es aislar y sellar el espacio entre cada electrodo, su espesor dependerá del espacio que se requiera entre cada electrodo este puede variar entre 3 y 7 mm.

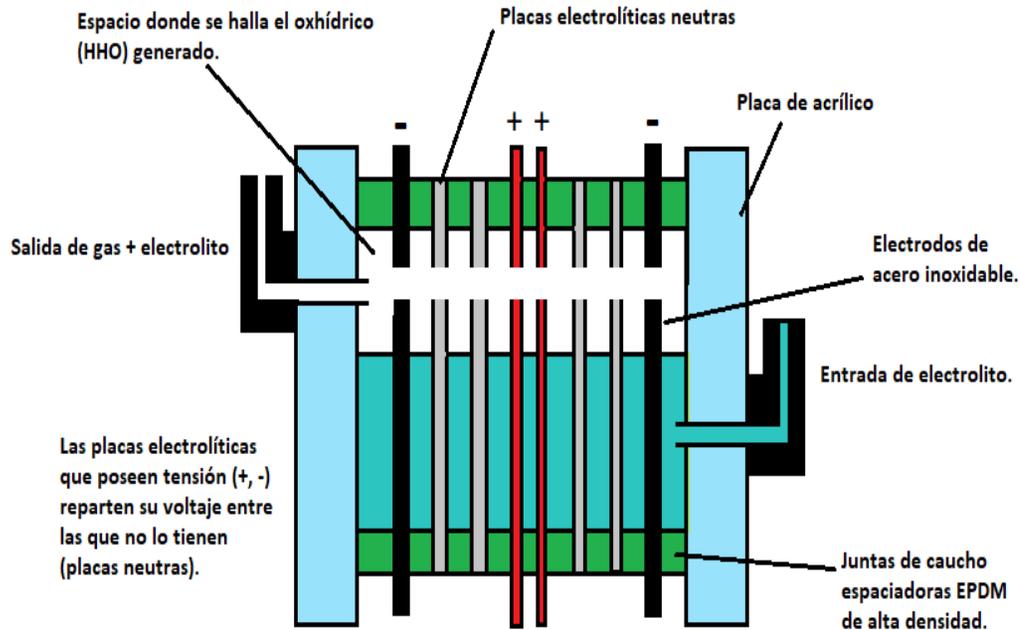


Ilustración 23 Partes del generador de hidrógeno.

(Fuente Rodríguez s. f.)

Diseño del Generador

El generador y todas sus partes serán diseñadas denotando sus dimensiones, material y forma. Para su diseño se hizo uso del software llamado Autodesk Inventor versión 2018.

En primer lugar, diseñamos las dos placas que van ubicadas a los extremos del generador sirviendo como aislador del flujo eléctrico, al tener que ser un material aislante y resistente se optó por material acrílico de 4 mm de grosor el cual nos brinda una correcta visibilidad de lo que está sucediendo dentro del generador.

En cuanto a las dimensiones de las placas de material acrílico son 200 x 300 x 4 mm, cada una de las placas están agujeradas como se muestra en la ilustración #7.

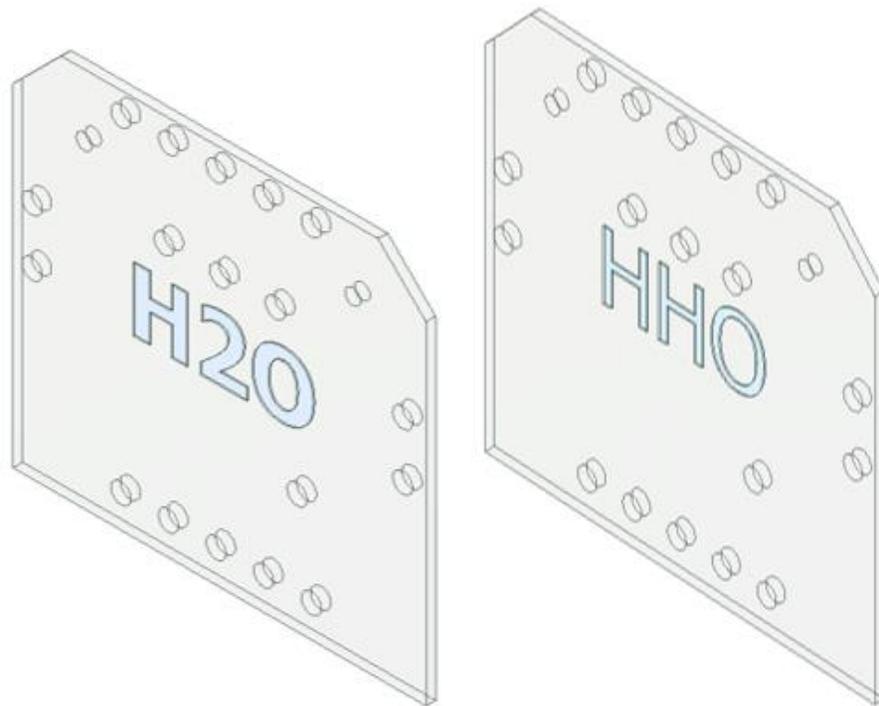


Ilustración 24 Placa de Ingreso y Salida.
(Fuente Autores)

Para lograr hermeticidad en el conjunto de placas, electrodos y juntas el agujero de 10 mm de diámetro servirá para insertar los pernos para lograr el ajuste. La placa delantera estará diseñada con 18 agujeros de los cuales 14 de 10 mm servirán para insertar los pernos de ajuste, 4 de 12 mm se utilizarán acoples en L para transportar el gas desde el generador hacia el burbujeador mediante cañerías hidráulicas.

El orden de las placas en nuestro diseño será de la siguiente manera:



De esta manera se obtendrá mayor producción de hidrógeno ya que en el proceso de electrolisis este es generado por los polos negativos y el polo positivo es el encargado de

generar oxígeno, mediante este orden de las placas se logrará obtener más hidrógeno ya que esta configuración posee dos placas con carga negativa.

Las placas neutras tienen la misión de disminuir la diferencia de potencial que existe entre las placas dado que, si solo se tuviese una placa positiva y otra negativa la diferencia de potencial que existiría entre una y otra sería toda la existente, es decir; que si se trabajara con un voltaje de 12 voltios el diferencial de potencial que habría sería de 12 voltios. En tal caso trabajaremos con una configuración de 5 placas neutras por polo negativo con lo cual la diferencia de potencial sería de 2 voltios esto se debe a que tenemos 5 placas y el número de saltos entre estas es 6 es decir, dividimos el voltaje ingresado (12 V) para el número de saltos (6) y obtenemos 2 voltios en la diferencia de potencial.

El siguiente diseño que se realizará serán las placas neutras, las mismas son construidas con chapas de acero inoxidable de alta pureza 304, su costo en el mercado no es muy elevado y se lo puede encontrar fácilmente, las mejores opciones en cuanto a la conductividad serían el platino o el oro, pero ya que su precio es demasiado elevado no se hizo uso de los mismos.

Las dimensiones utilizadas son 200 X 180 mm con un espesor de 3 mm como se muestra en la Figure 25:

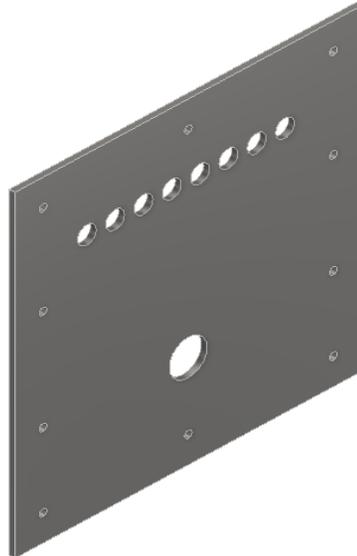


Ilustración 25 Placa Neutra.
(Fuente Autores)

En el caso de los electrodos que servirán de polos negativos y positivo serán construidos con chapas de acero inoxidable de alta pureza 304, y sus dimensiones son 200 X 180 mm con un espesor de 3 mm; además de sus dimensiones tiene una prolongación en una esquina de su diseño que servirá para darle polaridad a las placas y conducir corriente hacia el electrolito como se muestra en la Figure 23:

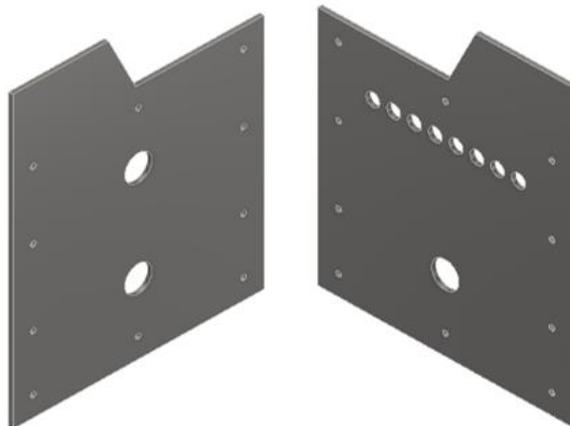


Ilustración 26 Electrodo Positivo y negativo
(Fuente Autores.)

Para lograr la hermeticidad en el conjunto de placas se construirán juntas de goma EPDM de alta densidad 200 X 180 mm con un espesor de 3 mm; además contar con agujeros para introducir tornillos sujetos los demás elementos como se muestra en la Figure 26:

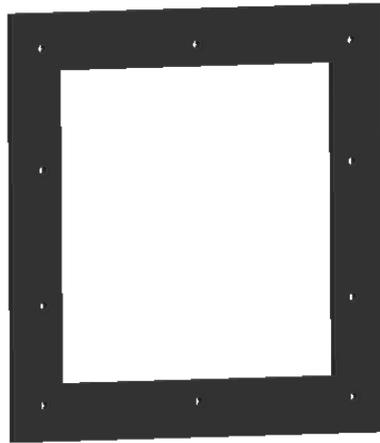


Ilustración 27 Junta de goma EPDM de alta densidad.

(Fuente Autores)

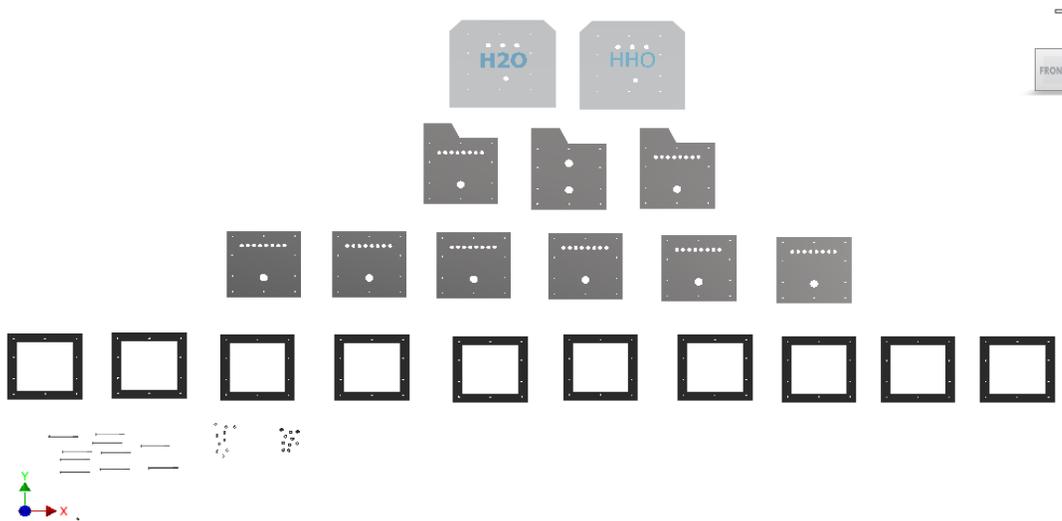


Ilustración 28 Pieza que conforman el generador

(Fuente Autores)

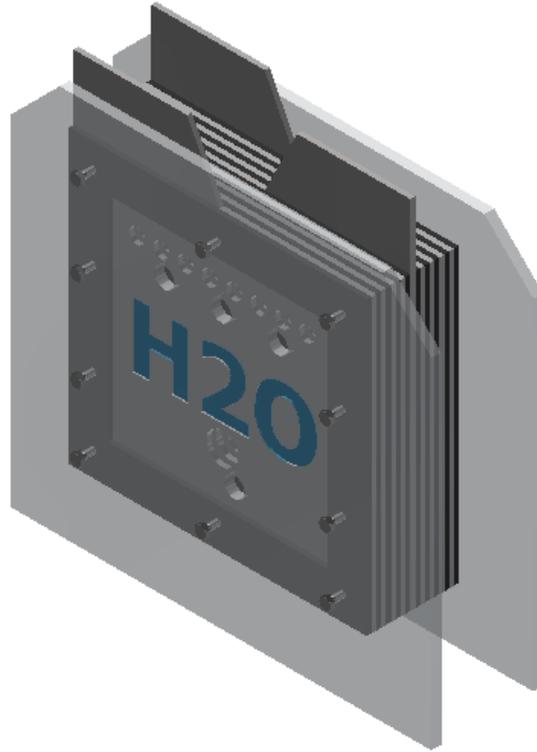


Ilustración 29 Ensamble final del generador

(Fuente Autores)

Partes del Generador

Tabla 9 Elementos del Generador de hidrógeno

| Nombre | Características | Cantidad |
|-----------|------------------------------------|----------|
| Laterales | Placas de acrílico Espesor :6mm | 2 |

| | | |
|----------------------|--|----|
| Electrodos Positivos | Acero Inox 316L Espesor:3mm | 1 |
| Electrodos Neutros | Acero Inox 316L Espesor:3mm | 6 |
| Electrodos Negativos | Acero Inox 316L Espesor:3mm | 2 |
| Juntas | Goma EPDM de alta densidad Espesor: 3mm | 10 |
| Pernos | Acero Inox | 10 |
| Arandela | Acero Inox | 10 |
| Tuercas | Acero Inox | 10 |
| Cinta de teflón | Cinta de teflón en rollo | 1 |

Fuente: Autores

Circuito de GAS

Para entender de mejor manera el recorrido del gas (Hidrógeno) por todo el circuito hasta llegar al motor, se realiza un bosquejo del recorrido en donde se aprecia que inicia desde el generador línea verde pasando por el burbujeador hasta llegar al múltiple de admisión y pasar a los cilindros en donde se realizará la combustión.

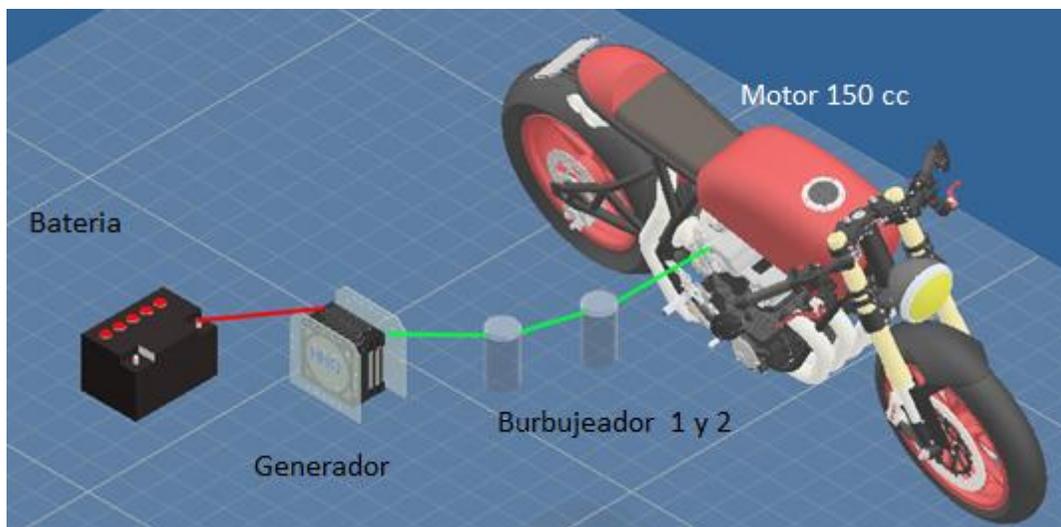


Ilustración 30 Bosquejo de la trayectoria del gas.

(Fuente Autores)

2.2.2 Elementos del Circuito de Gas.

Tabla 10 Componentes del Circuito Eléctrico

| Nombre | Características | Cantidad |
|--------------------------|--|----------|
| Generador de hidrógeno | | 1 |
| Burbujeador | Capacidad de 2 L | 1 |
| Deposito del Electrolito | Capacidad de 2 L | 1 |
| Manguera | Manguera transparente reforzada | 5m |
| | Racor instantáneo Forma L | |
| Racor en (L) | Para tubo de 1/2 in Polímero termodeformable | 3 |

Racor instantáneo

Forma T

Racor en T

Para tubo de 12 mm

1

Polímero técnico

Fuente: Autores

Circuito Eléctrico.

El siguiente esquema elaborado se muestra en la Fig.3.10; se hace uso de dos componentes y el Transistor MJE15031, el primero se encarga de generar la señal de control (pulso de señal) y el segundo se encarga de aplicarla a nuestro sistema generador de gas HHO con las escalas de corriente necesarias; este circuito se encuentra alimentado por los 12VDC del acumulador.

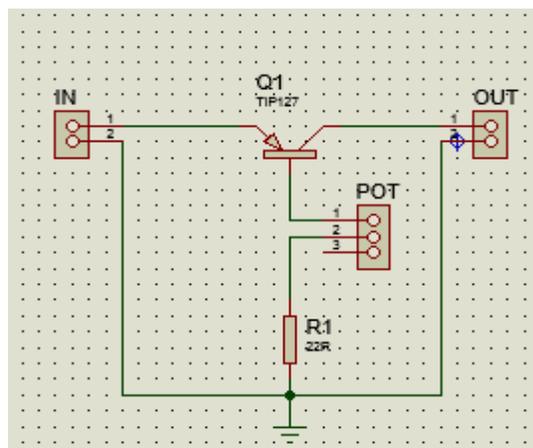


Ilustración 31 Circuito de control

(Fuente Autores)

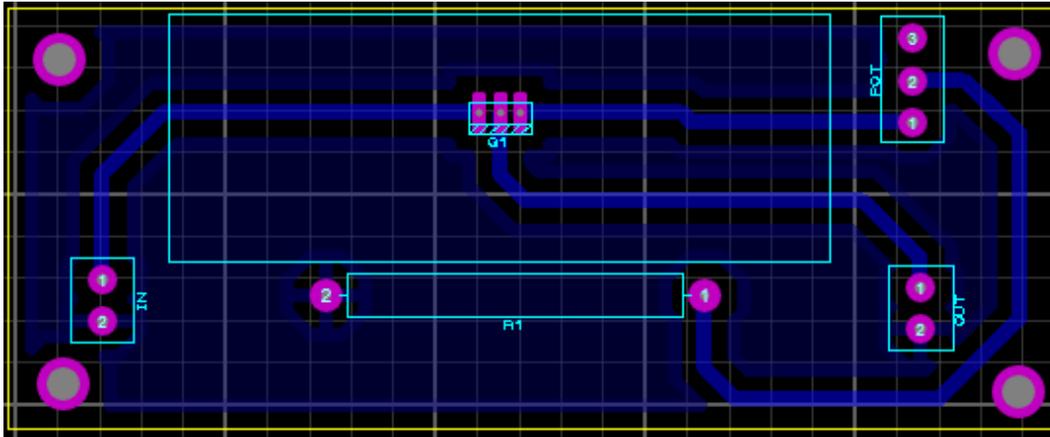


Ilustración 32 PBC del Circuito de Control

(Fuente Autores)

2.2.3 Elementos del circuito eléctrico.

Tabla 11 Lista de Materiales

Materiales para construcción.

| Cantidad | Material | Especificaciones |
|----------|---------------------|------------------|
| 1 | Resistencia | 5 W-22Ohm |
| 2 | Transistor MJE15031 | 1k a ¼ w |
| 1 | Potenciómetro | 50k |
| 1 | Caja para circuito | -- |

Fuente: Autores

CAPÍTULO III

CÁLCULOS TERMODINÁMICOS EN EL MOTOR 150 CC CON ADICIÓN DE HIDRÓGENO DETERMINANDO LOS PARÁMETROS INDICADOS Y EFECTIVOS DEL MOTOR.

3.1 Análisis Termodinámico Real del Motor OTTO 150 CC.

Para el análisis termodinámico se determina el motor y las de condiciones iniciales a las que se va a ejecutar las pruebas, las mismas se detallan a continuación:

La temperatura de inicio (T_1) con la que el aire ingresa al motor por el múltiple de admisión; para lo cual se utilizó un multímetro con el cual se obtuvo la temperatura del aire al ingreso 340°K.

La relación de compresión es un factor necesario para el análisis este se obtuvo a partir del manual del fabricante.

$$r = 9.2:1$$

Se obtiene la presión interna del colector de admisión a partir de los datos facilitados por el fabricante.

$$P_{admission} = 0.085 \text{ MPa}$$

El motor que se va a utilizar es de un solo cilindro de 150 cm^3 que funciona a 800rpm. A partir de los datos determinamos que es un motor cuadrado.

El combustible es hidrógeno con un valor calorífico declarado de $120.2 \times 10^6 \text{ MJ/kg}$ se utilizan los datos de la tabla 1.

El volumen barrido se considera como lleno de aire "fresco". Esto se debe a que el volumen de barrido se considera lleno de un gas inerte, pero que también tiene las propiedades del aire.

se define para contener un verdadero aire "fresco", cuyo significado teórico por lo cual es de 149.6 cm^3

La presión atmosférica es otra condición que se toma en cuenta, debido a que este va a variar dependiendo de la altura como se puede ver en la tabla 10

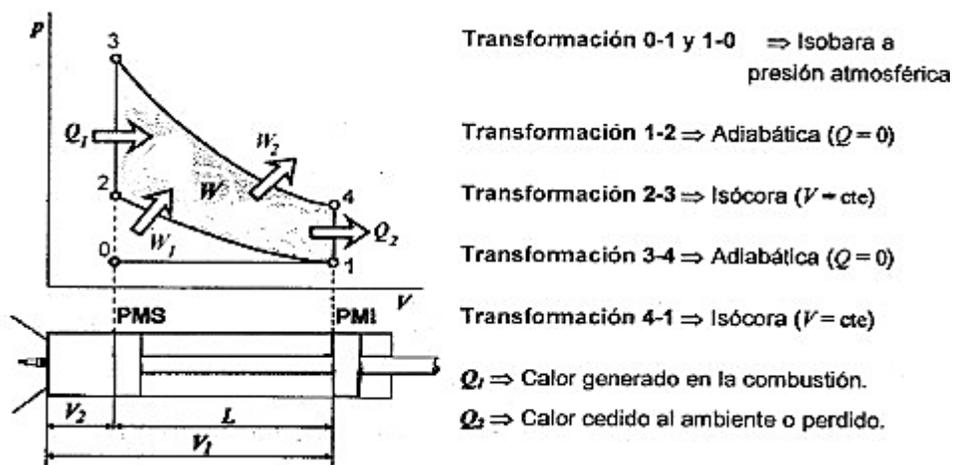


Ilustración 33 Ciclo termodinámico teórico Ciclo termodinámico teórico

(Fuente <https://jasf1961.wordpress.com/category/calculo-del-motor-engine-design/>)

Tabla 12 Datos Iniciales

| DATOS | |
|------------------------|--------------------|
| Relación de compresión | 9.2 |
| Temperatura inicial | 340°K |
| Presión Inicial | 0.8978 KPa |
| Volumen inicial | 150 cm^3 |

| | |
|--------------------|-----------------------|
| Volumen de barrido | 149.6 cm ³ |
| Potencia | |

Fuente: Autores

Calculamos la masa de aire en el cilindro de acuerdo con la ecuación 1

$$m_1 = \frac{897.8 * 0.00015m^3}{287 * 340} = 1.380x10^{-5}kg$$

De la ecuación 2 se calcula la masa de aire atrapada en el cilindro m_{ta} :

$$m_{ta} = 0.947 \frac{kg}{m^3} * 150x10^{-4}m^3 * 800 * 0.5$$

$$m_{ta} = 0.056820 kg/m^3$$

Masa de Combustible la cual se define en la ecuación 4.

$$m_{tf} = \frac{0.056820 kg/s}{15.06} = 3.7729x10^{-3}kg$$

Energía Liberada por el Combustible mediante la ecuación 5

$$Q_3^2 = 1 * 3.7729x10^{-3}kg * 120.2x10^6 = 453.50 J$$

De la ecuación 6 el proceso 1-2 Compresión adiabática e isotrópica, se encuentra como:

$$P_2 = 897.8 * 25.12 = 22.552x10^5Pa$$

De la ecuación 7 la temperatura final de la Compresión, T_2 : se define como:

$$T_2 = 340 * 2.5120 = 854K$$

De las Ecuación 8, el trabajo realizado durante la compresión es negativo:

$$w_1^2 = -m_1 C_v (T_2 - T_1)$$

Para encontrar C_v tenemos que basarnos en las tablas de calores específicos que tenemos especificado en la tabla.

Tabla 13 Calor Especifico H_2

| Hidrógeno, H_2 | | | |
|------------------|------------------|------------------|-------|
| Temperatura K | C_p kJ/kg*K | C_v kJ/kg*K | k |
| 250 | 14.051 | 9.927 | 1.416 |
| 300 | 14.307 | 10.183 | 1.405 |
| 350 | 14.427 | 10.302 | 1.400 |
| 400 | 14.476 | 10.352 | 1.398 |
| 450 | 14.501 | 10.377 | 1.398 |
| 500 | 14.513 | 10.3.89 | 1.397 |

Fuente: Termodinámica (Yunes A Cengel y Michael A. Boles 2011)

Como la temperatura deseada no se encuentra en la tabla optamos en la interpolación por la siguiente ecuación:

$$f_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad \text{Ecuación 43}$$

$$f_1(x) = 10.183 + \frac{10.302 - 10.183}{350 - 300} (340 - 300)$$

$$C_v = 10.2782 \text{ kJ/kg*K}$$

$$w_1^2 = -1.380 \times 10^{-5} \text{kg} * 10.2782 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} (854 - 340)$$

$$w_1^2 = -0.0729$$

$$w_1^2 = -72.905 \text{ J}$$

El cambio de energía interna realizado durante la compresión es positivo, por lo tanto:

$$\begin{aligned} U_2 - U_1 &= m_1 * C_v * (T_2 - T_1) \\ &= 1.380 \times 10^{-5} \text{kg} * 10.2782 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} (854 - 340) \\ &= 72.905 \text{ J} \end{aligned}$$

Proceso 2-3 Combustión a volumen constante se aplica la primera ley de la termodinámica mediante la ecuación 9 antes mencionado.

$$Q_2^3 = U_3 - U_2 + W_2^3 = m_1 C_v (T_3 - T_2) + 0$$

La cual despejamos para despejar la ecuación 10 Temperatura T_3

$$\begin{aligned} T_3 &= T_2 + \frac{Q_2^3}{m_1 C_v} \\ &= 854 + \left(\frac{453.505 \text{ J}}{1.380 \times 10^{-5} \text{kg} * 10278200 \text{ J/kg}} \right) \\ T_3 &= 587.19^\circ \text{K} \end{aligned}$$

Usando la ecuación 11 la presión 3 se encuentra como:

$$P_3 = P_2 * \frac{V_2}{V_3} * \frac{T_3}{T_2} =$$

$$P_3 = p_2 * \frac{T_3}{T_2}$$

$$P_3 = 22.552 \times 10^5 Pa * \frac{857.19}{854}$$

$$P_3 = 51.049 Pa$$

Cambio de energía durante el proceso 2-3 utilizando la ley anterior antes mencionada.

$$U_3 - U_2 = Q_2^3$$

Proceso 3-4 Expansión adiabática e isotrópica

Con la ecuación 13 la temperatura al final de la expansión T_4 se expresa como:

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{1-\gamma} = (CR)^{\gamma-1}$$

$$T_4 = 587.19^\circ K / 2.512$$

$$T_4 = 233.75^\circ K$$

Presión al final de la expansión P_4 se utiliza la ecuación 14.

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{-\gamma} = P_3 (CR)^{-\gamma}$$

$$P_4 = 51.049 / 10^{1.4}$$

$$P_4 = 2.032 \times 10^{-5} Pa$$

Trabajo realizado durante la expansión con la ecuación 15 es positiva.

$$w_3^4 = -m_1 C_v (T_4 - T_3)$$

$$w_3^4 = -1.380 \times 10^{-5} * 10278200 J/kg (233.75^\circ K - 587.19^\circ K)$$

$$w_3^4 = 5013 J$$

El cambio de energía interna realizado durante la expansión es negativo:

$$U_4 - U_3 = m_1 C_v (T_4 - T_3)$$

$$1.380 \times 10^{-5} * 10278200 J/kg (233.75^\circ K - 587.19^\circ K)$$

$$= -5013 J$$

En el proceso 4-1 Rechazo de Calor a volumen constante

$$Q_1^4 = U_1 - U_4 + W_4^1 = m_1 C_v (T_1 - T_4) + 0$$

Cambio de energía interna durante el rechazo de calor de 4-1:

$$U_1 - U_4 = Q_4^1 = m_1 C_v (T_1 - T_4)$$

$$= 1.380 \times 10^{-5} * 10278200 J/kg (340 - 233.75^\circ K)$$

$$= 1507 J$$

Obtención de valores netos para el ciclo

$$Q_4^1 = 1507 J$$

Producción neta de trabajo del ciclo W_{net} :

$$W_{net} = w_1^2 + w_3^4$$

$$W_{net} = -72.905 J + 5013 J$$

$$W_{net} = 4940J$$

La eficiencia térmica del ciclo Otto viene dada por:

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{Q_2}$$

$$\eta_t = \frac{4940J}{453.505J} = 10.89$$

La presión efectiva media indicada, P_{mi} , se puede encontrar mediante la ecuación 21:

$$P_{mi} = \frac{4940J}{149.6 \times 10^{-6} m^3} = 33.02 \times 10^5 Pa$$

La potencia de salida del motor se puede encontrar mediante la ecuación 22:

$$\dot{W} = 4940J * \frac{800}{120}$$

$$\dot{W} = 32.9 \times 10^3 W$$

La tasa de consumo de combustible, \dot{m}_f se obtiene a partir de la ecuación 23:

$$\dot{m}_f = 1.380 \times 10^{-5} kg * \frac{800}{120}$$

$$\dot{m}_f = 9.20 \times 10^{-5} kg/s$$

El consumo específico de combustible indicado se calcula mediante la ecuación 23.

$$isfc = \frac{9.20 \times 10^{-5} kg/s}{32.9 \times 10^3 W}$$

$$isfc = 2.796 \times 10^{-9} kg/Ws$$

Resulta más conveniente, en unidades más convencionales de kg/kWh, esto se convierte

en:

$$isfc = 2.796 \times 10^{-9} \frac{kg}{Ws} = 2.796 \times 10^{-9} * 10^3 * 3600 \frac{kg}{Ws} \frac{W}{kW} \frac{s}{h} = 0.0100 kg/kWh$$

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE POTENCIA Y PAR EFECTIVOS DEL MOTOR MEDIANTE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Resumen

En el capítulo IV se realizaron pruebas simultáneas lo cual se utilizó un analizador de gases para determinar el beneficio que implica el adaptar un generador de gas hidrógeno en el motor de 150cc.

4.2 Recopilación De Muestras

Para obtener las diferentes muestras de los distintos gases que liberados por el motor tales como: monóxido de carbono CO, dióxido de carbono CO₂, hidrocarburos HC; y de celda electroquímica para determinar oxígeno molecular O₂ y opcionalmente óxidos de nitrógeno NO_x.

Se llevaron a cabo muestras de emisiones contaminantes las cuales se realizaron con la maquina ANALIZADOR DE GASES AUTOMOTRIZ AGS 688. Este analizador está configurado para realizar una medición aplicando el método Non Dispersive Infra red (NDIR) para analizar CO, HC y CO₂, y el método electroquímico para analizar O₂ y NO_x. Además, se comprueba el dosado de aire/combustible, entre sus principales características se encuentran:

- Excelente precisión, estabilidad y durabilidad Compatible para 5 gases (Opción NO_x, cuando usted lo desea)
- Tiempo de respuesta inferior a 10 segundos
- Ajuste automático de calentamiento 2-8 minutos
- 5 etapas del sistema de filtración para la protección del banco

- Función de retención de la medición de pausa
- Software oficial de pruebas de emisiones
- Prueba de HC residual

4.3 Procedimiento de obtención de las muestras

Para las motocicletas se tienen en cuenta únicamente los valores de: HC, CO. El proceso de toma de muestras está basado en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2203:

- 1 Someter al equipo a un período de calentamiento y estabilización, según las especificaciones del fabricante
- 2 Eliminar cualquier material particulado y elimine cualquier material extraño o agua que se haya acumulado en el tubo de ensayo que podría alterar las lecturas de la prueba.
- 3 Verificar que el vehículo esté en neutro.
- 4 Compruebe que el control del estrangulador manual no esté en funcionamiento y que los accesorios del vehículo estén apagados
- 5 Verificar en el vehículo que el sistema de escape en perfecto estado de funcionamiento y sin ningún comportamiento a los del diseño que provoque la dilución de los gases de escape o sus fugas.
- 6 Si el vehículo no cumple con las condiciones mínimas establecidas, la prueba no se debe realizar.
- 7 Verificar el nivel de aceite en el cárter esté entre el mínimo y máximo recomendado por el fabricante, con el motor apagado y el vehículo en posición horizontal.
- 8 Dar arranque el motor y verifique que este a la temperatura normal de funcionamiento.

4.4 Medición.

1. Con el motor encendido y en su temperatura normal de funcionamiento y en estado de ralentí, introducir la sonda de prueba en el sistema de escape del vehículo. Tener en cuenta que la sonda permanezca fija dentro del sistema de escape mientras se realiza la prueba.
2. Esperar el tiempo de respuesta del equipo de medición dado por cada fabricante.
3. Imprimir las lecturas estabilizadas de las emisiones medidas.

a. Procesamiento de la información

La información recopilada de las 13 pruebas en los 3 estados de carga (ralentí, media carga, límite de carga) en las diferentes mezclas de la combustible gasolina, hidrógeno y gasolina-hidrógeno serán procesadas, las herramientas que posibilitan un mejor y rápido procesamiento de la información son realizadas a través de los equipos informáticos como programas de análisis estadísticos (Minitab 19), permitiendo un adecuado orden y análisis de las informaciones. “Minitab es un paquete que abarca todos los aspectos necesarios para el aprendizaje y la aplicación de la estadística en general” (2006, pág. 1).

Los Ing. Moncayo & Sarango establecen, que este programa tiene está estrechamente relacionado con técnicas de análisis estadístico avanzado como:

Análisis descriptivo

Contrastes de hipótesis

Regresión lineal y no lineal

Series temporales

Análisis de tiempos de fallo

Control de calidad

Análisis factorial

ANOVA

Análisis clúst

4.4.1 Análisis de monitoreo de gases

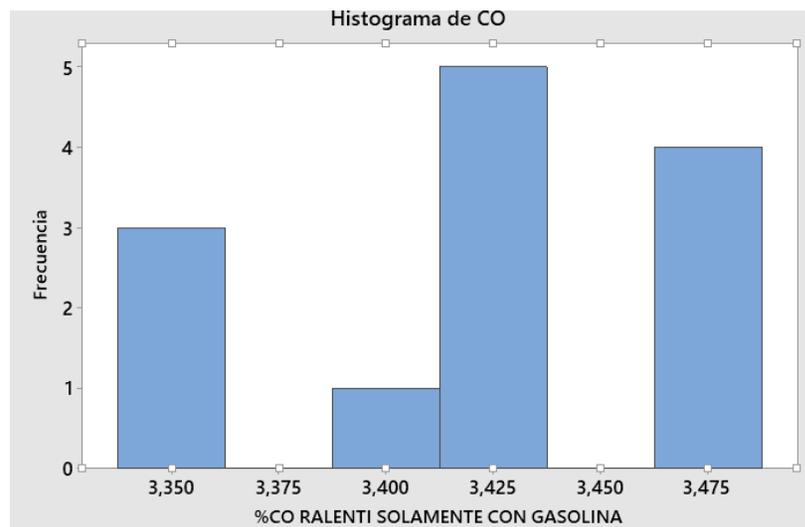


Ilustración 35 Histograma de Monóxido de carbono en ralentí solamente con gasolina.

La dispersión de los valores es no es uniforme con un pico de frecuencia en 5 y 3.4223 % de CO como media de sus valores en relación con los valores mostrados no superan los límites establecidos en la normativa ecuatoriana lo cual sugiere un correcto reglaje del motor y por ende una correcta combustión.

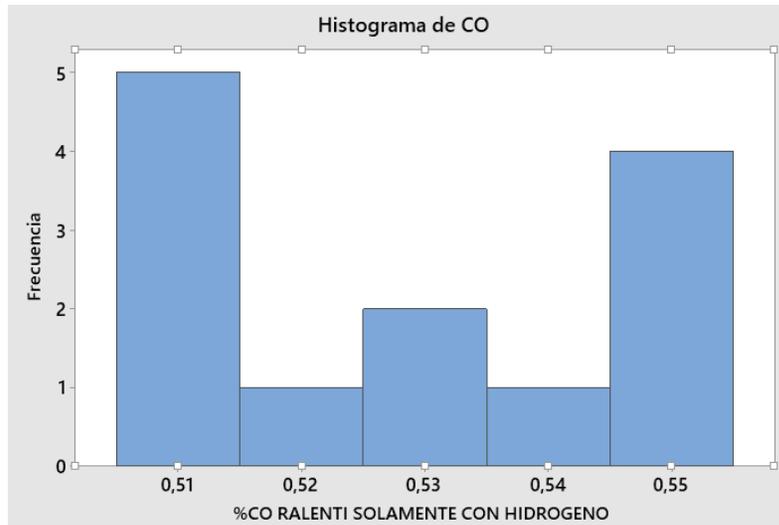


Ilustración 36 Histograma de Monóxido de carbono en ralentí solamente con hidrógeno

La dispersión no uniforme se indica en valores, con una mayor frecuencia en valores de 0.51% y pocas muestras con valores entre 0.52% y 0.54% lo cual sugiere una mejor combustión por parte del hidrógeno y una disminución considerable en la emisión de gases al ambiente

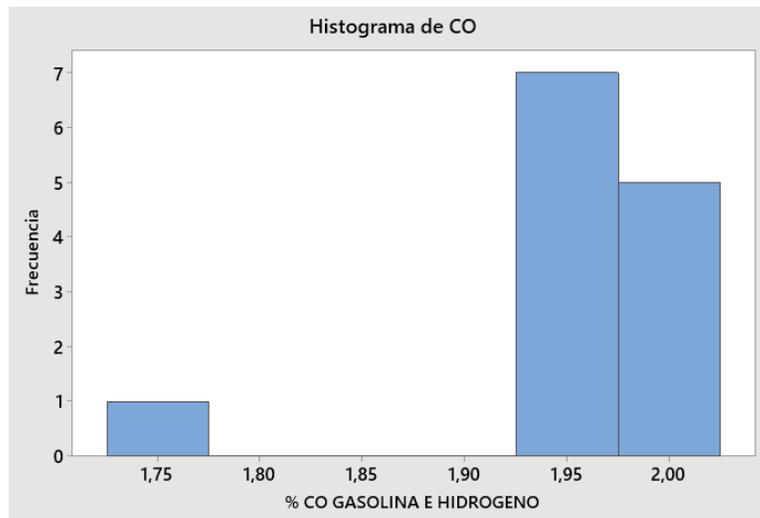


Ilustración 37 Histograma de Monóxido de carbono en ralentí gasolina e hidrógeno

Las muestras no uniformes muestran una dispersión hacia la derecha con mayor frecuencia en valores entre 1.94% y 1.96% lo cual indica una mejor combustión entre la mezcla aire-combustible gracias al poder calorífico del hidrógeno

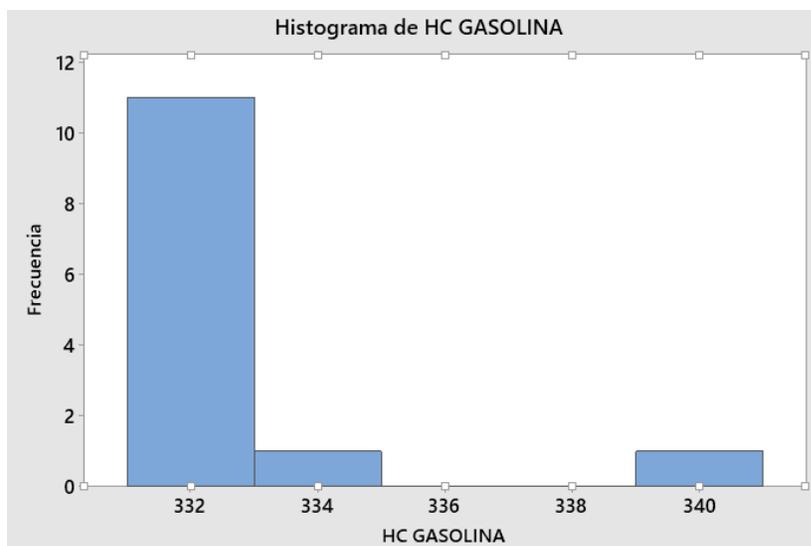


Ilustración 38 Histograma de Hidrocarburos en ralentí solamente con gasolina

Se observa que los resultados de HC tienden a agruparse al lado izquierdo de la gráfica, con un valor mayoritariamente de 331 y 334. Con valor promedio de 332.231 ppm.

En pocas muestras los valores de HC se sitúan en 338 ppm los cuales están dentro del rango en la normativa ecuatoriana.

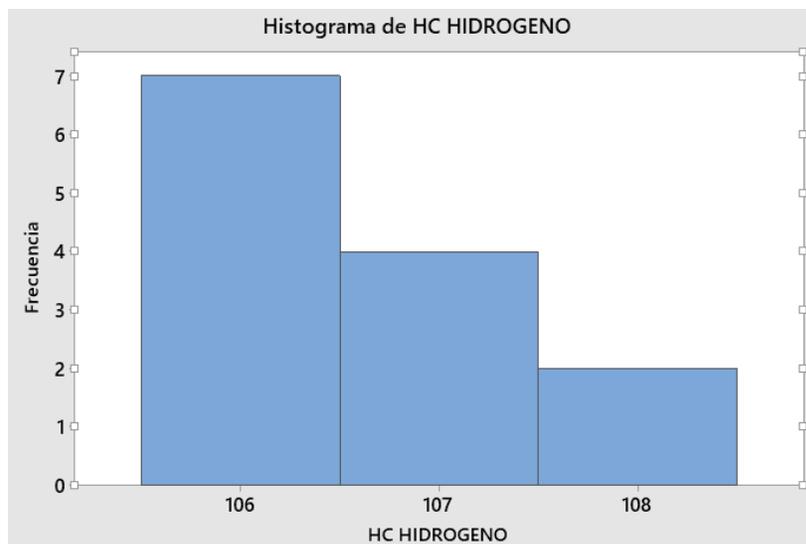


Ilustración 39 Histograma de hidrocarburos en ralentí solamente con hidrógeno

Al cortar la alimentación de gasolina hacia el motor e incorporar el hidrógeno se observa que los valores del HC son mayormente de 106 con un pico de frecuencia de 7, pocos valores llegan a 108 ppm

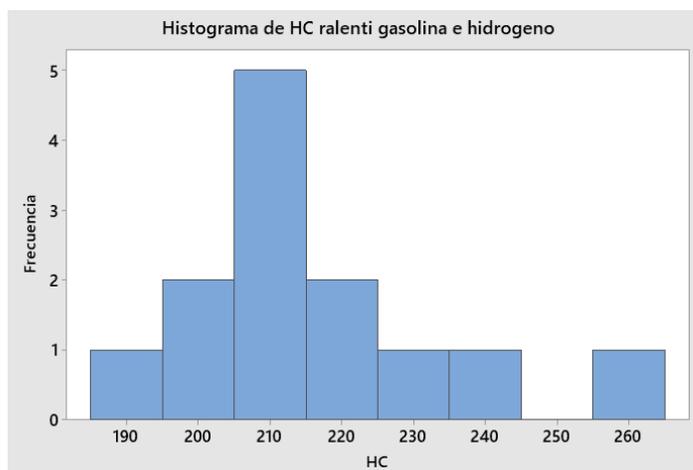


Ilustración 40 Histograma de hidrocarburos en ralentí gasolina e hidrógeno.

Las muestras indican una dispersión no uniforme con un pico de frecuencia en 5 con una media 215.461 ppm, los valores superiores a 250 representan una deficiencia en el sistema de inyección del hidrógeno hacia la cámara de combustión, estos valores están dentro de los

límites establecidos por la normativa ecuatoriana y denotan una mejor combustión de la mezcla

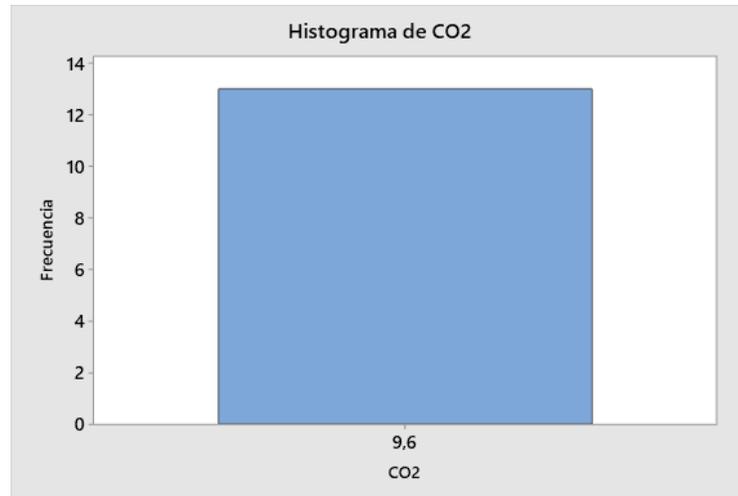


Ilustración 41 Histograma de Dióxido de carbono en ralenti con gasolina.

En la ilustración 41 todas las muestras se sitúan en el centro de la gráfica con valores de 9.6%

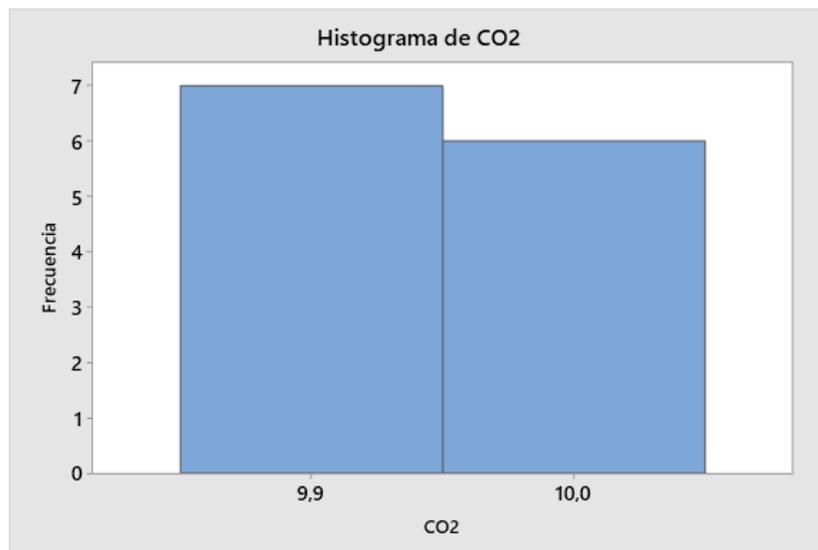


Ilustración 42 Histograma Dióxido de carbono ralenti hidrógeno

Los valores de la mayoría de las muestras denotan una eficiente combustión del hidrógeno con valores de CO₂ entre 9.9% y 10%

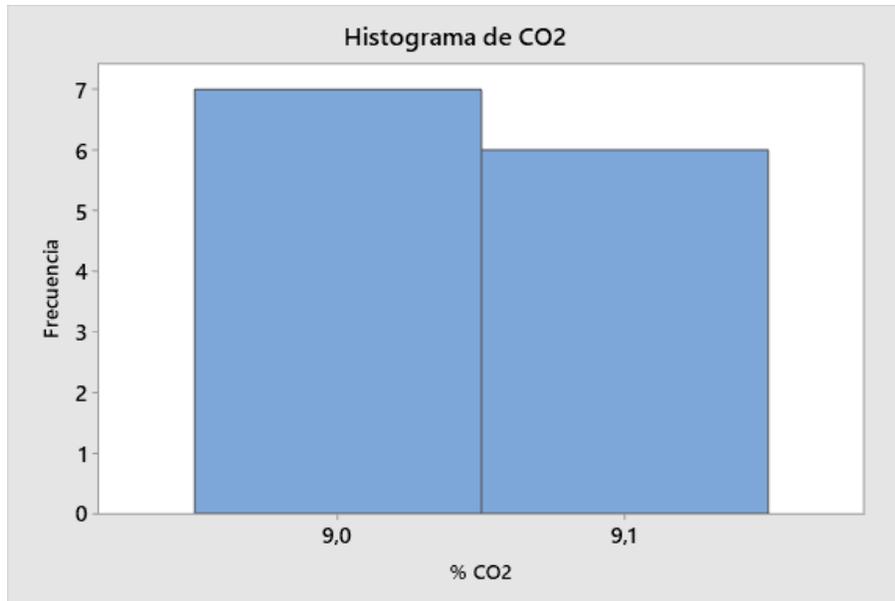


Ilustración 43 Histograma de Dióxido de carbono en ralentí con gasolina e hidrógeno

Se aprecian que las muestras se agrupan en el centro de la gráfica con valores entre 9% y 9.1% lo cual denota una eficiente combustión.

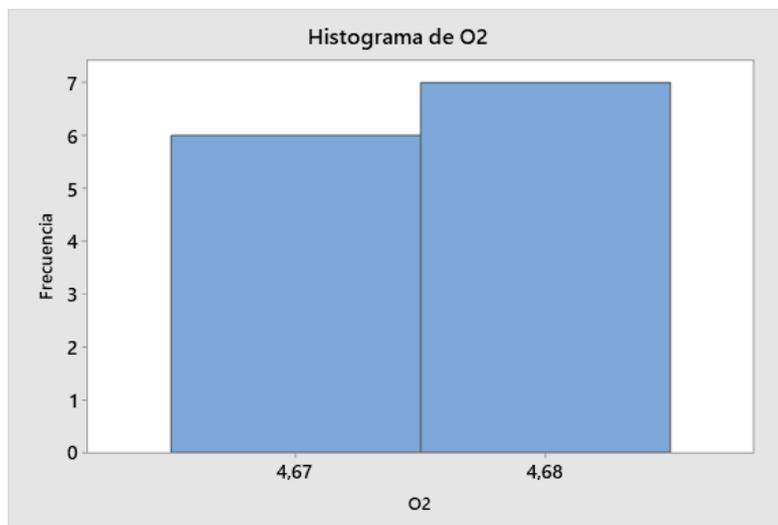


Ilustración 44 Histograma de Oxígeno en ralentí gasolina

Se muestra una mayor concentración de los datos en la parte central de la gráfica con valores pico de 4.68% los cuales están dentro de los límites establecidos por la normativa

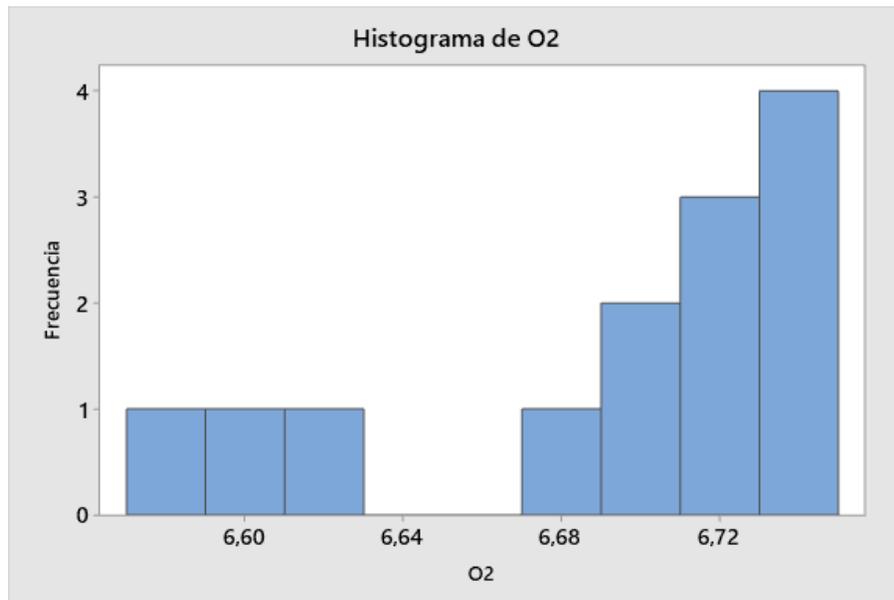


Ilustración 45 Histograma de Oxígeno en ralentí hidrógeno

La grafica denota una dispersión no uniforme de las muestras hacia la derecha entre 6.68% y 6.74% esto es debido a la combustión del hidrógeno dentro de la cámara del motor lo cual da como resultado vapor de agua (H_2O), por lo tanto, los valores de O_2 que registra el analizador son mayores, pero siguen dentro de los límites permitidos.

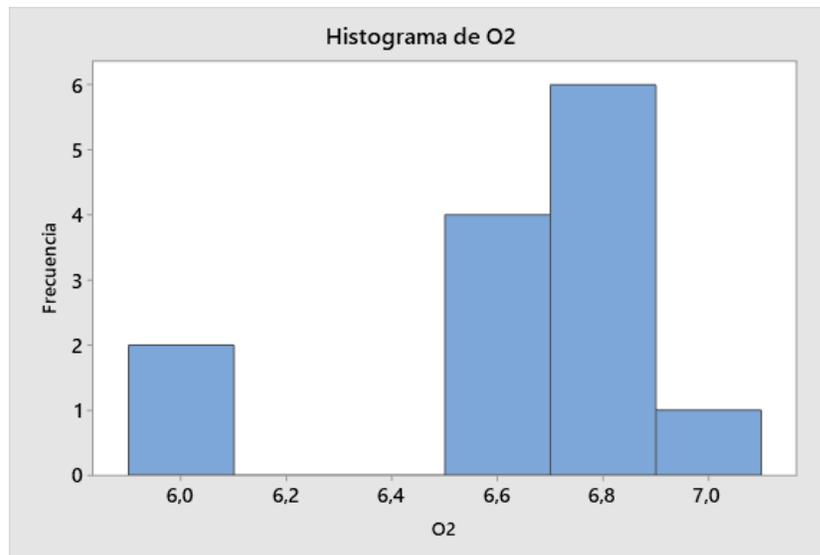


Ilustración 46 Histograma de Oxígeno en ralentí gasolina e hidrógeno

Se muestra una dispersión no uniforme hacia la parte derecha de la gráfica teniendo los valores superiores a 6.5% esto denota la adición de hidrógeno a la mezcla aire-combustible lo cual da como resultado una disminución considerable de los gases de escape y se evidencia un incremento de oxígeno.

Los muestreos fueron realizados dentro de la Universidad Politécnica Salesiana en la ciudad de Cuenca en una motocicleta de 150 cc de cuatro tiempos en 3 condiciones: ralentí, media carga y plena carga.

4.5 Normativa Ecuatoriana

Según la norma Técnica Ecuatoriana PRTE INEN 136 “MOTOCICLETAS”. Establece los valores máximos de emisiones permisibles para las motocicletas. En porcentajes de contaminación tomando en cuenta solo los valores de CO y HC.

Tabla 14 Comparación con la normativa ecuatoriana de las muestras obtenidas en las diferentes pruebas

| Cilindrada | TODAS | |
|---|-----------------|-----------------|
| Normativa ecuatoriana | CO (% V) | HC (ppm) |
| Límites establecidos | 3.5 | 2000 |
| Ralentí con gasolina | 3.4223 | 332.231 |
| Ralentí con hidrógeno | 0.5285 | 106.615 |
| Ralentí con Gasolina e hidrógeno | 1,959 | 215,462 |

En la tabla 14 se muestran los límites establecidos por la normativa ecuatoriana PRTE INEN 136 “MOTOCICLETAS”, en la primera prueba en estado de ralentí en condiciones normales de funcionamiento con el motor alimentado por gasolina (ECO) obtenemos valores promedio de CO en 3.422% y valores de HC en 332.231 ppm los cuales no superan los límites establecidos.

En la segunda prueba con el motor en condiciones normales de funcionamiento alimentado únicamente por hidrógeno (H₂) la media de valores obtenidos de CO y HC son 0.5285% y 106.615 ppm respectivamente lo cual nos indica que existe una reducción considerable de monóxido de carbono emitido al ambiente, que en comparación con los límites establecidos por la normativa los valores están muy por debajo de los límites así como también con valores de emisión de motocicletas que tienen integrado AECS (Sistema Avanzado de Control de Emisiones) su valor de % de CO límite es de 0.5

4.6 Probabilidad de la hipótesis

Método

Tabla 15 Método (Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis).

| | |
|------------------------|---------------------------------|
| Hipótesis nula | Todas las medias son iguales |
| Hipótesis alterna | No todas las medias son iguales |
| Nivel de significancia | $\alpha = 0,05$ |
| Medias | |

Tabla 16 Desv.Est. agrupada = 0,0359398

| Factor | N | Media | Desv.Est. | IC de 95% |
|------------------|----|---------|-----------|--------------------|
| CO con Gasolina | 13 | 3,4223 | 0,0476 | (3,4017; 3,4429) |
| CO con Hidrógeno | 13 | 0,52846 | 0,01772 | (0,50789; 0,54903) |

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Tabla 17 Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

| Factor | N | Media | Agrupación |
|--------------|----|---------|------------|
| CO GASOLINA | 13 | 3,4223 | A |
| CO HIDRÓGENO | 13 | 0,52846 | B |

Análisis de Varianza

Tabla 18 Valor $p = 0.000$

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|---------------|-----------|------------------|------------------|----------------|----------------|
| Factor | 1 | 54,4332 | 54,4332 | 42141,87 | 0,000 |
| Error | 24 | 0,0310 | 0,0013 | | |
| Total | 25 | 54,4642 | | | |

Para descartar una hipótesis nula en nuestro proyecto se utilizó el software minitab comparamos los diferentes valores de las muestras de CO en ralentí (con gasolina y otra solo con hidrógeno)

Para lo cual verificamos el valor p con el que se no es posible rechazar o aceptar la hipótesis

Una $p < 0,05$ significa que la hipótesis nula es falsa y una $p > 0,05$ que la hipótesis nula es verdadera. El valor de p está vinculado a la fiabilidad del estudio, cuyo resultado será mucho más confiable cuanto más bajo sea la p: en realidad, el valor de p nos indicaría la probabilidad de obtener un valor similar si se realiza el experimento en las mismas condiciones.

El valor de p nos indica la importancia del resultado, p solo indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar.

Con los valores obtenidos y cumpliendo todas expectativas del método nuestras medias entre todas las muestras son significativamente diferentes y el valor p dado en la tabla 18 es $p= 0.00$ con lo cual rechazamos una hipótesis nula en nuestro proyecto

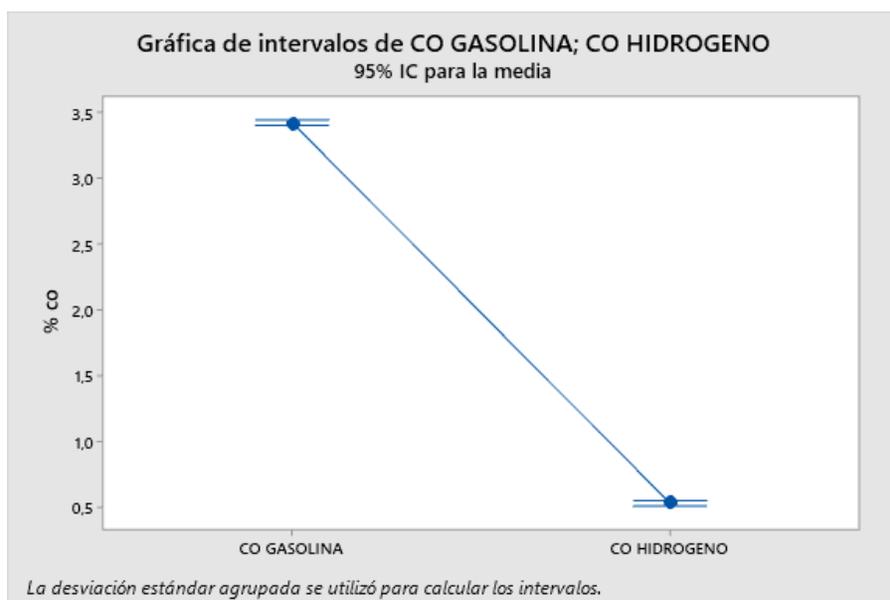


Ilustración 47 Diferencia entre las medias de las muestras %CO

Tabla 19 Resultados de la prueba de análisis de gases.

| Estado | Valor | HC | CO | CO ₂ | O ₂ |
|--------------------|------------|---------|--------|-----------------|----------------|
| Ralentí (850 RPM) | Máximo | 333 | 3.48 | 9.6 | 4.68 |
| | Mínimo | 331 | 3.42 | 9.6 | 4.67 |
| | Promedio | 332.231 | 3.4223 | 9.6 | 4.675 |
| | # Muestras | | | 13 | |
| Ralentí Hidrógeno | Máximo | 108 | 0.55 | 10 | 6.74 |
| | Mínimo | 106 | 0.51 | 9.9 | 6.58 |
| | Promedio | 106.615 | 0.5285 | 9.946 | 6.689 |
| | # Muestras | | | 13 | |
| Carga media (2500) | Máximo | 13 | 3.17 | 10.4 | 4.08 |
| | Mínimo | 190 | 2.97 | 10.2 | 3.74 |

| | | | | | |
|----------------------|------------|---------|-------|--------|-------|
| | Promedio | 192.077 | 3.074 | 10.346 | 3.888 |
| | # Muestras | | | 13 | |
| | Máximo | 188 | 4.48 | 10.5 | 2.69 |
| Plena carga de carga | Mínimo | 177 | 4.37 | 10.4 | 2.64 |
| (3500) | Promedio | 184.615 | 4.418 | 10.485 | 2.673 |
| | # Muestras | | | 13 | |

Fuente Autores

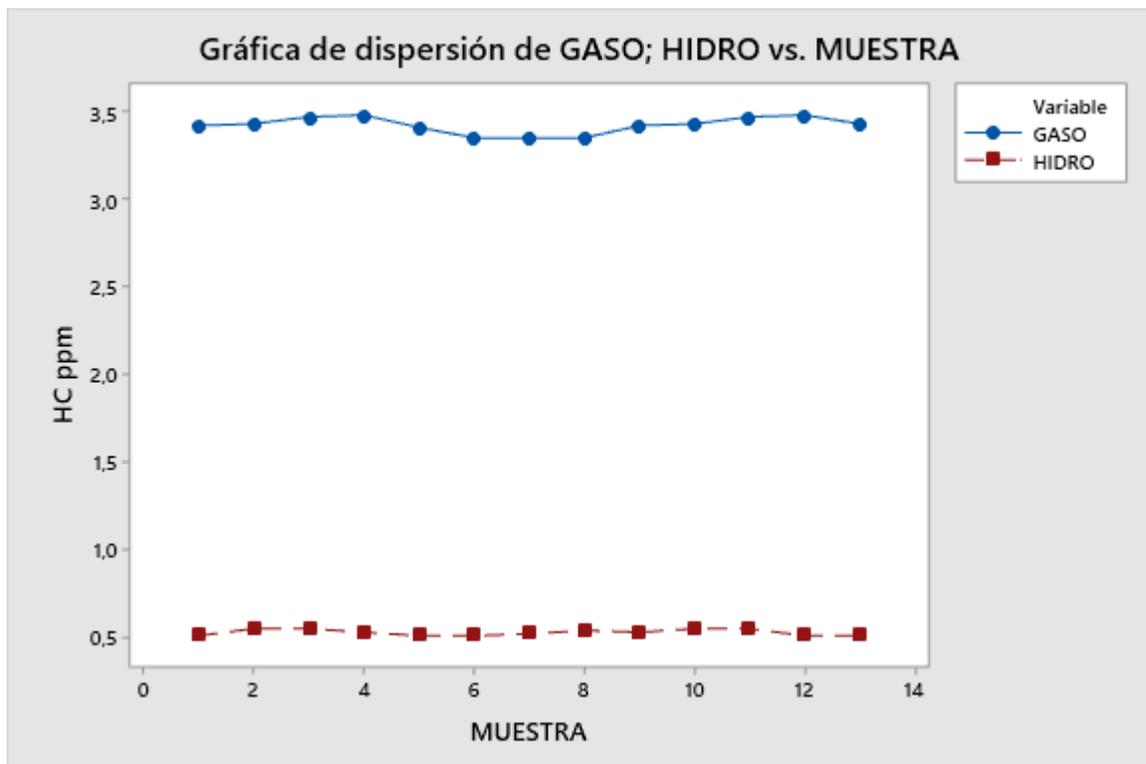


Ilustración 48 Variación de CO

(Fuente Autores)

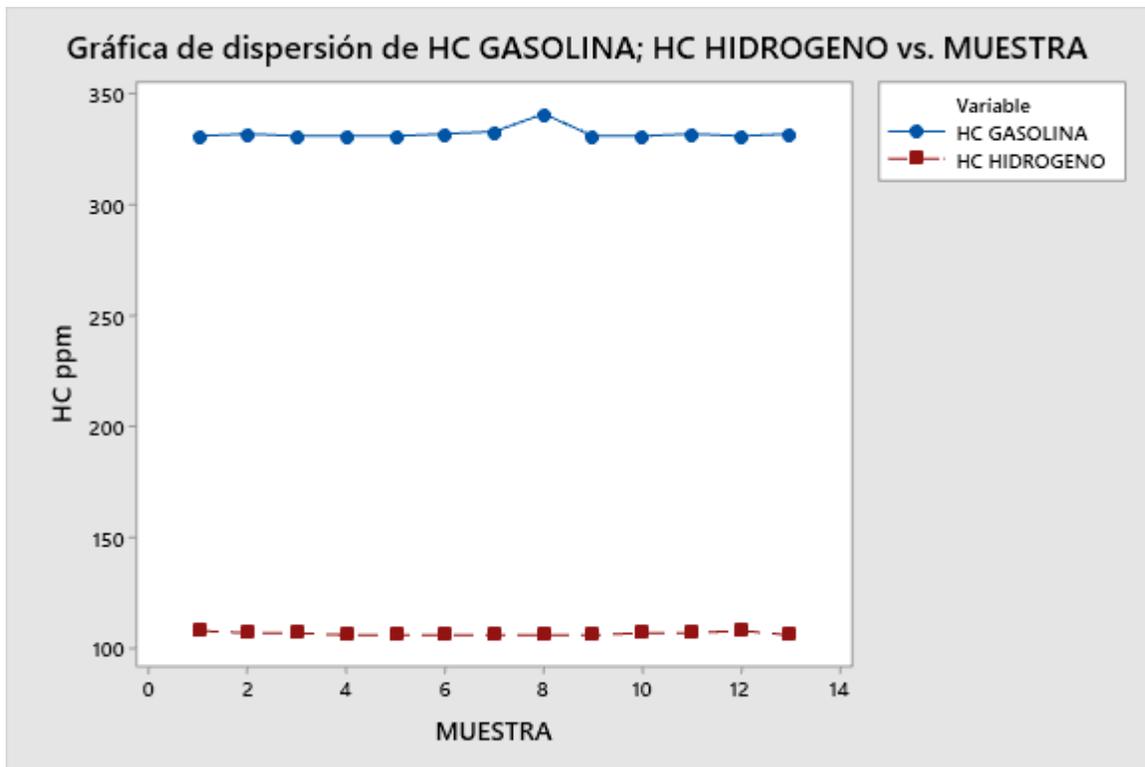


Ilustración 49 Variación de HC

(Fuente Autores)

En la ilustración 49 se observa la variación de HC en donde se puede evidenciar una disminución de los valores de hidrocarburos no quemados con respecto a las pruebas realizadas sin el generador de hidrógeno y con él, en el sistema de admisión del vehículo en prueba, esto gracias al poder calorífico del hidrógeno. La gasolina tiene una temperatura de ignición de 260°C (Cengel, 2014), sin embargo, este valor de temperatura para el hidrógeno es de 580°C (Cengel, 2014), lo cual implica que cuando se tenga modificación del sistema de admisión se incrementará el valor másico de hidrógeno en la mezcla lo cual al no tener alimentación de gasolina los valores de HC disminuyen.

CONCLUSIONES

El generador de hidrógeno está diseñado en una computadora con el software Autodesk Inventor 2019. El generador está construido con materiales resistentes a la corrosión como el acero inoxidable y genera el gas de hidrógeno que alimenta el motor de una motocicleta de 150 CC.

La adición del hidrógeno al motor no afecta la combustión del motor, de hecho, esto mejora a la combustión de manera más eficiente debido al alto grado de inflamabilidad que posee produciendo menos gases contaminantes y aumentando la eficacia de la combustión.

La producción del gas hidrógeno son proporcionales a la superficie de las placas y a la intensidad de la corriente que las hace circular del generador, otro punto en tomar en cuenta es la cantidad de electrolito que se utiliza ya que este puede aumentar o disminuir la corriente del generador y de esta manera se puede producir mayor o menor cantidad de gas HHO

El sistema de gas HHO está instalado en un motor de motocicleta de 150 cc y las emisiones se registran en comparación con los rpm registradas. Las pruebas con el sistema de admisión estándar del motor y la modificación del sistema HHO mostraron una reducción en los considerable en las emisiones.

El mejor lugar para que el gas de HHO ingrese al motor es por el carburador, ya que absorbe el oxígeno necesario para la combustión y proporciona una mezcla equilibrada. Esto permite que el motor funcione cuando ingresa hidrógeno puro el cual proviene del

burbujeador de seguridad el cual actúa también como válvula check evitando un retroceso de llama.

El dióxido de carbono presenta un incremento de 2,5% a 1500 RPM (Gráfico 41), por otro lado, el monóxido de carbono de la misma manera presenta una disminución considerable con la implementación del sistema de HHO lo cual implica una combustión más completa.

El aumento de las emisiones de oxígeno implica que se utilizó una mayor cantidad de oxígeno en el proceso de combustión con el sistema de HHO por lo cual observamos a la salida del escape es vapor de agua.

Con la adición con el sistema de hidrógeno en el dosado en el sistema de admisión en el motor producimos un incremento en la presión media ejercida en la carrera de expansión del cilindro, por lo que obtenemos un volumen, por lo cual el trabajo neto sobre el eje por que el motor está funcionando con dos combustibles se nota una notable repotenciación del motor.

En el motor en ralentí solo con la adición del gas de HHO (Ilustración 39) se observa que los valores del HC disminuyen considerable en comparación a las muestras obtenidas del HC con el motor alimentado por gasolina.

El motor en ralentí con los combustibles funcionando tuvo una variación significativa aumentando un 50% el valor de las RPM, en los gases de escape se evidencio una mezcla equilibrada en combustible por la disminución de HC y disminución en el valor del CO₂, esto ocurrió porque el hidrógeno posee un poder calorífico mayor

RECOMENDACIONES

Se recomienda usar siempre los implementos de seguridad tales como mandil, gafas y guantes para la protección en la manipulación del electrolito.

Cabe recordar la polaridad con la que se conecta el generador de hidrógeno es vital importancia, ya que el contacto positivo genera oxígeno y en contacto negativo genera hidrógeno.

Utilice siempre agua destilada para el generador de gas HHO. Debido a que el agua natural contiene minerales adicionales, lo que es perjudicial para las placas de Inox, y reduce la vida útil del generador.

Es recomendable no utilizar el generador HHO cuando el motor no esté encendido ya que el hidrógeno posee un alto grado de inflamabilidad.

Se recomienda hermeticidad en todo el sistema tanto como en el generador como en el depósito evitando así el desperdicio de electrolito.

Revisar las conexiones que estén bien aisladas o caso contrario puede tener pérdidas de corriente.

Es recomendable realizar un mantenimiento regular en el generador de gas HHO. El depósito de almacenamiento no debe estar a menos de 1/4 del nivel del agua electrolítica, ya que el burbujeo ya no actuará como un factor de seguridad.

Es recomendable usar una válvula check a la salida del hidrógeno hacia el motor evitando así un retorno del gas hacia el depósito lo cual causaría una explosión no deseada en el burbujeador.

Continuar las investigaciones que impliquen las fuentes de combustibles alternativos así preservar los recursos del planeta con un objetivo en específico alcázar una movilidad al 100% no contaminante.

Bibliografía

Alejandro Pineda. 2009. «Evaluación técnico-económica de una planta de hidrógeno mediante electrólisis de agua utilizando energía eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia». Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Amores E, y Sánchez M. 2020. «Centro Nacional del Hidrógeno». *Centro Nacional del Hidrógeno*. Recuperado (<https://www.cnh2.es/investigación/producción-de-hidrógeno/>).

AMT-Solar. 2012. «The Energy Innovations Company». Recuperado (<http://www.amt-solar.com/index.php/es/hidrógeno/que-es-el-hidrógeno/>).

BAEZA, RAMON. s. f. «HORIZONTE A LARGO PLAZO EN LA GENERACIÓN ENERGÍAS RENOVABLES». 20.

E. Red. 2012. «Ecología Activa». Recuperado 24 de enero de 2020 (http://4.bp.blogspot.com/-owpKE2p6rUo/T_5sjcdOLEI/AAAAAAAAAG5Q/V-NBh3cLYHU/s1600/celda+basica+hho+electrolisis+ecologia+activa.jpg).

H. A. Apez González, J. T. Cruz García y J... A. Navarrete Negrete. 2010. «Celda Electrolítica». *Boogger*. Recuperado 24 de enero de 2020 (<http://celdaelectrolitica.blogspot.com/>).

Jordi, Llorca Piqué. 2010. *El Hidrógeno y nuestro futuro energético (1º Ed.)*. Vol. 1. Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona: Ediciones UPC.

LENNTECH BV. 2013. «Water Threament Solutions».

S. Z. Baykara, 2004. «Experimental solar water thermolysis, Experimental solar water thermolysis».

Aguirre Guevara, Oscar Adrián. 2013. «CELDA DE HIDROGENO Y SU POTENCIAL DE APLICACION». Universidad Veracruzana, Xalapa Veracruz México.

Amores E y Sánchez M. 2020. «Centro Nacional del Hidrógeno». *Centro Nacional del Hidrógeno*. Recuperado (<https://www.cnh2.es/investigacion/produccion-de-hidrogeno/>).

Fábrega Ramos, Marc. 2009. «HIDRÓGENO APLICACIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA». Facultat de Nàutica de Barcelona, España-Barcelona.

F. Payri y J. M. Desantes. s. f. *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Barcelona - Bogotá- Buenos Aires-Caracas-México: Reverté.

Hector Holgado Secas. 2012. «Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrógeno por electrólisis». Facultat de Nàutica de Barcelona, UPC, Barcelona.

M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez. 2008. «Principios de Electrodeposición». *Lecturas de Ingeniería*, Unam Cuautitlán.

Marc Fábrega Ramos. 2008. «Hidrógeno aplicación en Motores de Combustión Interna». Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Payri, F., y J. M. Desantes. 2011. *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Barcelona-España: EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Rodríguez. s. f. «Hidrógeno como solución». *Hidrógeno como solución*. Recuperado (<https://hidrogenocomosolucion.wordpress.com/el-generator/>).

Yunes A Cengel y Michael A. Boles. 2011. *Termodinámica*. Vol. Séptima Edición. México.

ANEXOS

ANEXO 1: Celda de Hidrógeno terminada.





ANEXO 2: Proceso de construcción de la celda de hidrógeno.
(Gomas aislantes)



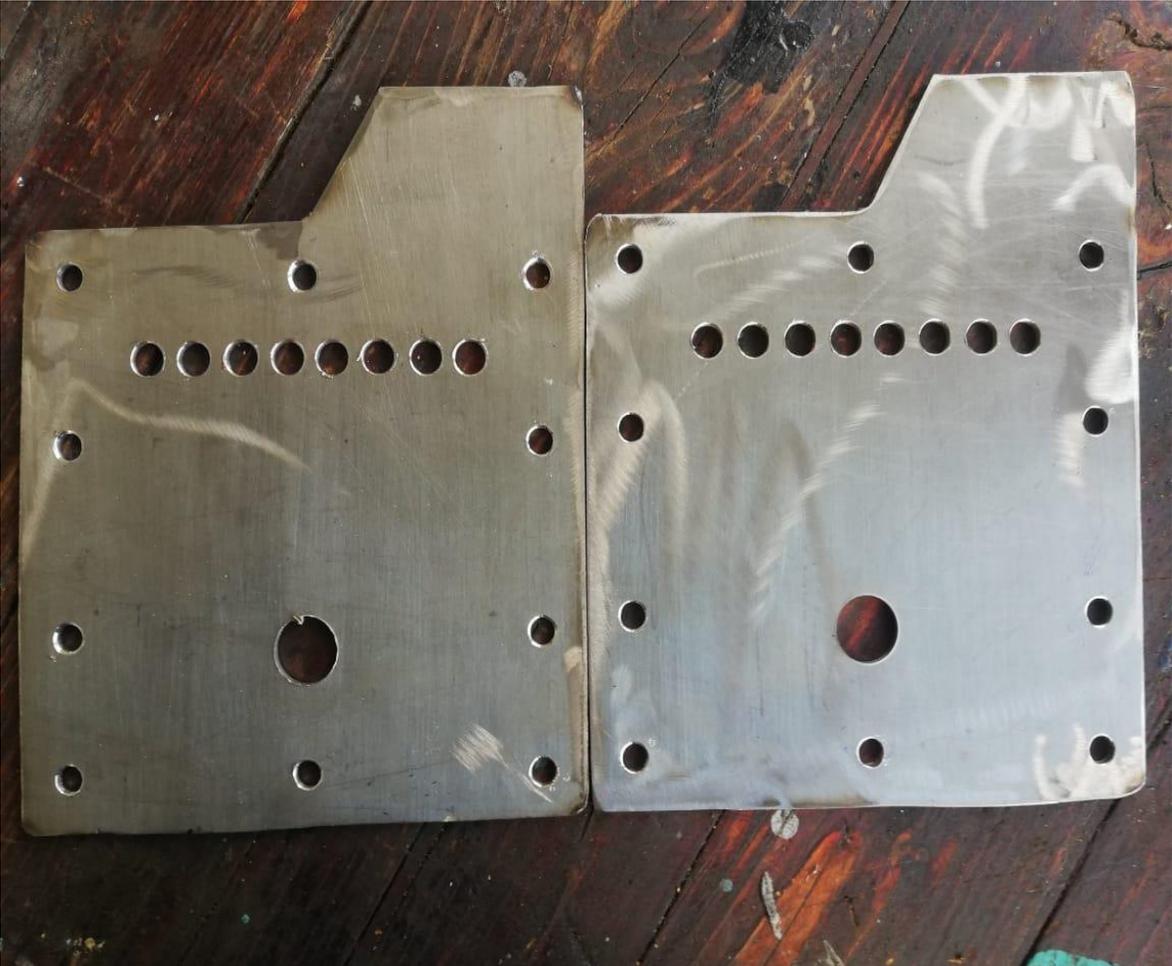
Placa Negativa del generador



Placas Neutras



Placas Positivas del Generador



ANEXO 3: Burbujeador de sistema.



ANEXO 4: Acoples tipo L, T idispensables para la correcto señado de la celda.



ANEXO 5: Resultados de las pruebas de análisis de gases sin el sistema.















Anexo 6: Análisis de gases con el generador de hidrógeno y gasolina.













ANEXO 7: Análisis de gases con el sistema de hidrógeno.











