



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE  
OBTENER HIDRÓGENO PARA UTILIZARLO COMO  
COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA  
SUZUKI DE 75 cm<sup>3</sup>.**

**AUTOR: EDWIN FABRICIO TELENCHANA CUSPA**

**DIRECTOR: ING. GERMÁN ERAZO.**

**LATACUNGA**

**2018**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**CERTIFICACIÓN**

ING. GERMÁN ERAZO (DIRECTOR) CERTIFICACIÓN:

Certifico que el trabajo de titulación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE OBTENER HIDRÓGENO PARA UTILIZARLO COMO COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA SUZUKI DE 75 cm<sup>3</sup>”**, realizado por el señor **EDWIN FABRICIO TELENCHANA CUSPA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto, me permito acreditarlo y autorizar al señor **EDWIN FABRICIO TELENCHANA CUSPA** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, marzo 2018

Ing. Germán Erazo

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **EDWIN FABRICIO TELENCHANA CUSPA** con cédula de ciudadanía C.C.: 180417418-1 declaro que este trabajo de titulación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE OBTENER HIDRÓGENO PARA UTILIZARLO COMO COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA SUZUKI DE 75 cm<sup>3</sup>”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, marzo 2018

Edwin Fabricio Telenchana Cuspa

C.C.: 180417418-1



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

## **AUTORIZACIÓN**

**YO: EDWIN FABRICIO TELENCHANA CUSPA**

Autorizo a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la Institución el proyecto de **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE OBTENER HIDRÓGENO PARA UTILIZARLO COMO COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA SUZUKI DE 75 cm<sup>3</sup>”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, marzo del 2018.

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Edwin Fabricio Telenchana Cuspa', is written over a horizontal line.

**Edwin Fabricio Telenchana Cuspa**

C.C.: 180417418-1

## **DEDICATORIA**

Este sueño quiero dedicar a JHS, nuestra trinidad, por toda su gracia y bendiciones derramadas en mí y mi amada familia, a mi hijo hermoso y mi amor eterno Armando Gonzalo en el cielo; mi “Chalito”, a mi esposa por su cariño y comprensión María del Carmen, a mi angelito Alisson Evolet, mi “Shalom”, a mis pilares fundamentales mis papis Nelly y Gonzalo, a mis hermanos Henry, Jimena y a toda mi familia Telenchana – Cuspa en general, que con su aliento y buena FE han sabido ser mi FELICIDAD.

Edwin Fabricio

## AGRADECIMIENTO

A Dios por todas las bendiciones derramadas en nosotros sus hijos.

A mi mamita Nelly por su esfuerzo y amor incondicional entregado para formar el hombre que soy, a mi papi Gonzalo por su constante aliento de seguir siempre en busca de la verdad a base del conocimiento.

A mi esposa María del Carmen por escuchar, entender y sobre todo enfrentar la vida con amor y paciencia de mi mano.

A mis angelitos y luz de mi vida Armando Gonzalo (+) y Alisson Evolet por ser mi enfoque a luchar y seguir adelante.

A mis hermanos Jimena y Henry por su apoyo incondicional en momentos buenos y malos del caminar diario.

A mis sobrinos Katty, Carlita y Gabrielito que con su inocencia alegran nuestras vidas.

A mi familia en general por estar siempre ahí en todo momento apoyando.

A estos grandes maestros formadores de Líderes Ing. Danilo Zambrano, Ing. Alex Cevallos, Dr. Freddy Jaramillo y en especial por su guía y apoyo en el presente proyecto de titulación Ing. Alberto Naranjo y al Ing. Germán Erazo que han sabido extender esa mano amiga y desinteresada en beneficio de juventudes necesitadas de verdad y conocimiento.

Edwin Fabricio

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>PORTADA .....</b>	<b>i</b>
<b>CERTIFICACIÓN.....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....</b>	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN .....</b>	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xv</b>
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES .....</b>	<b>xix</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xxi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xxii</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INVESTIGACIÓN DE UN REACTOR DE OBTENER HIDRÓGENO PARA UTILIZARLO COMO COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA</b>	
1.1. Antecedentes del problema .....	1
1.1.1. Contextualización (macro, meso y micro).....	2
1.1.2. Análisis crítico.....	3
1.1.3. Prognosis.....	4
1.1.4. Control de la prognosis.....	5
1.1.5. Delimitación (temporal, espacial y contenido).....	6
1.2. Planteamiento del problema.....	6
1.3. Descripción resumida del proyecto.....	7
1.4. Justificación de la investigación.....	8

1.4.1.	Interés de la investigación. ....	10
1.4.2.	Utilidad teórica (experimental).....	11
1.4.3.	Utilidad práctica.....	11
1.5.	Objetivos .....	11
1.5.1.	Objetivo general.....	11
1.5.2.	Objetivos específicos .....	11
1.6.	Metas.....	12
1.7.	Hipótesis.....	12
1.8.	Variables de investigación.....	12
1.8.1.	Variable independiente.....	13
1.8.2.	Variable dependiente.....	13
1.9.	Metodología.....	14
1.9.1.	Método experimental. ....	15
1.9.2.	Método deductivo. ....	15
1.9.3.	Método inductivo.....	15
1.9.4.	Método sintético. ....	16
1.9.5.	Método analítico. ....	16
1.9.6.	Método comparativo .....	16
1.9.7.	Método de observación directa.....	16
1.9.8.	Método de la medición.....	16
1.9.9.	Método matemático .....	17

## **CAPÍTULO II**

### **EL HIDRÓGENO**

2.1.	Introducción.....	19
2.2.	Razones para el uso del hidrógeno. ....	22
2.3.	Características del hidrógeno. ....	23

2.4.	El hidrógeno en la industria aeroespacial y experimental.....	27
2.5.	Producción de Hidrógeno.....	29
2.5.1.	Producción distribuida .....	33
2.5.2.	Producción centralizada. ....	33
2.5.3.	Procesos térmicos. ....	34
2.5.4.	Reformado de gas natural.....	34
2.5.5.	Gasificación.....	36
2.5.6.	Pirólisis.....	37
2.5.7.	Termólisis del agua.....	38
2.5.8.	Electrólisis.....	38
2.5.9.	Producción de hidrógeno por electrólisis del vapor de agua.....	39
2.6.	Economía del hidrógeno.....	40
2.7.	Electrolito .....	41
2.7.1.	El agua como electrolito.....	42
2.8.	Depósito de electrolito .....	42
2.9.	Método de introducción del hidrógeno al motor .....	42
2.10.	Reactor de hidrógeno. ....	43
2.11.	Sosa cáustica.....	44
2.12.	Agua.....	45
2.12.1.	Propiedades fisicoquímicas.....	46
2.12.2.	Densidad.....	47
2.12.3.	Composición del agua.....	48
2.12.4.	El agua disuelve algunas cosas.....	51
2.13.	Combustión del hidrógeno en motores alternativos.....	52
2.14.	Combustión de hidrógeno en turbinas de gas.....	53
2.15.	Proyectos significativos .....	54

2.15.1.	Funcionamiento de los motores de hidrógeno. ....	56
2.16.	Almacenamiento y transporte del hidrógeno.....	56
2.17.	Transporte y distribución .....	58
2.18.	Levantamiento de fórmulas .....	58
2.18.1.	Mezcla de gases. ....	58
2.18.2.	Combustibles y combustion .....	60
2.18.3.	Relación de equivalencia.....	62
2.18.4.	Flujo de aire y combustible que ingresa al motor.....	62
2.18.5.	Procesos de combustión. ....	63
2.18.6.	Fórmulas básicas complementarias a utilizar en el desarrollo del diseño. .	64
2.18.7.	Flujo de gas hidrógeno. ....	65
2.18.8.	Torque (T). ....	66
2.18.9.	Potencia al freno (P).....	67

### **CAPÍTULO III**

#### **REACTOR DE HIDRÓGENO PARA UTILIZARLO COMO COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

3.1.	Levantamiento de requerimientos.....	68
3.1.1.	Datos de los elementos del reactor de hidrógeno .....	69
3.1.2.	Cálculo del flujo del gas hidrógeno – oxígeno .....	74
3.2.	Construcción del generador de gas hidrógeno – oxígeno .....	77
3.2.1.	Construcción de los electrodos con placas de acero inoxidable quirúrgico. ....	81
3.2.2.	Construcción de los depósitos del reactor 1 (R1) y reactor 2 (R2).....	86
3.2.3.	Construcción del mini depósito de hidrógeno .....	89
3.3.	Acoplamiento de las partes.....	91
3.4.	Diseño del circuito eléctrico.....	93
3.5.	Instalación del sistema de generación hidrógeno – oxígeno al motor de	

	combustión interna.....	97
3.5.1.	Instrucciones de seguridad. ....	97
3.5.2.	Consideraciones iniciales .....	98
3.5.3.	Proceso de instalación del sistema.....	98
3.5.4.	Depósito principal de almacenamiento de hidrógeno. ....	100
3.5.5.	Sistema de control.....	100
3.6.	Solución electrolítica.....	101
3.7.	Verificación de operación del sistema .....	101
3.8.	Mantenimiento del sistema de generación de gas.....	102
3.8.1.	Nivel de agua destilada .....	103

## **CAPÍTULO IV**

### **PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

4.1.	Introducción.....	104
4.2.	Equipos.....	104
4.2.1.	Dinamómetro de resistencias eléctricas motor Villers F15.....	104
4.2.2.	Analizador de gases QGA 6000. ....	106
4.2.3.	Motocicleta Ranger 110 cc.....	107
4.3.	Pruebas de potencia y torque .....	108
4.4.	Cálculo de la velocidad angular.....	117
4.5.	Cálculo de la potencia .....	119
4.6.	Pruebas para obtención de la fuerza - hidrógeno.....	121
4.7.	Cálculo del torque con hidrógeno .....	127
4.8.	Cálculo de la potencia con hidrógeno .....	129
4.9.	Comparación del torque generado por la gasolina vs hidrógeno.....	130
4.10.	Comparación de la potencia generada por la gasolina vs hidrógeno .....	131
4.11.	Pruebas con el analizador de gases QGA-1000.....	131

**CAPÍTULO V****MARCO ADMINISTRATIVO**

5.1.	Factibilidad de la investigación .....	136
5.1.1.	Recursos humanos. ....	136
5.1.2.	Recursos materiales .....	137
5.1.3.	Recursos tecnológicos.....	137
5.1.4.	Recursos institucionales.....	138
5.2.	Costo de construcción e instalación del generador de hidrógeno .....	138
5.2.1.	Costos del reactor de hidrógeno. ....	139
5.2.2.	Costo del motor de combustión interna a gasolina. ....	139
5.2.3.	Costos de las pruebas. ....	140
5.3.	Fuentes de financiamiento.....	140
	CONCLUSIONES .....	141
	RECOMENDACIONES .....	142
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	143
	ANEXOS .....	145

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Emisión de gases contaminantes al ambiente. ....	9
Tabla 2	Operacionalización de la variable independiente.....	13
Tabla 3	Operacionalización de la variable dependiente.....	13
Tabla 4	Metodología, instrumentación y laboratorios. ....	17
Tabla 5	Abundancia promedio en la Tierra de isótopos estables. ....	25
Tabla 6	Propiedades del hidrógeno.....	27
Tabla 7	Valores de constante dieléctrica y momento dipolar para algunos líquidos. ....	52
Tabla 8	Comparación de las emisiones de un GICC (ELCOGAS en Puerto llano) en modo gas de carbón comparado con otras tecnologías fósiles. .	54
Tabla 9	Ficha técnica del reactor de hidrógeno.....	68
Tabla 10	Dimensiones de los componentes .....	69
Tabla 11	Resultados de área de las placas .....	72
Tabla 12	Volúmenes individuales de las partes del reactor .....	73
Tabla 13	Resultados de volumen de placas.....	77
Tabla 14	Materiales .....	78
Tabla 15	Volumen total de la cámara del reactor.....	101
Tabla 16	Características técnicas.....	105
Tabla 17	Dinamómetro Villers F15 .....	105
Tabla 18	Características técnicas de la motocicleta .....	108
Tabla 19	Datos obtenidos del dinamómetro utilizando gasolina convencional. ..	109
Tabla 20	Datos de la velocidad vs fuerza torsional real producida. ....	110
Tabla 21	Datos de la velocidad vs tiempo del consumo de combustible.....	111
Tabla 22	Datos de la velocidad vs consumo másico de aire. ....	112
Tabla 23	Datos de la velocidad vs temperatura de los gases de escape.....	113

Tabla 24	Datos de la velocidad vs número de revoluciones. ....	114
Tabla 25	Datos de la velocidad vs número de revoluciones. ....	116
Tabla 26	Datos de la velocidad angular. ....	118
Tabla 27	Datos de la potencia obtenida. ....	120
Tabla 28	Datos obtenidos del dinamómetro utilizando gas hidrógeno - oxígeno. .... .....	122
Tabla 29	Datos de la velocidad vs fuerza torsional real producida. ....	123
Tabla 30	Datos de la velocidad vs tiempo del consumo de combustible.....	124
Tabla 31	Datos de la velocidad vs consumo másico de aire. ....	125
Tabla 32	Datos de la velocidad vs temperatura de los gases de escape.....	126
Tabla 33	Datos de la velocidad vs número de revoluciones. ....	127
Tabla 34	Datos del torque generado a diferente velocidad. ....	128
Tabla 35	Datos de la velocidad angular. ....	129
Tabla 36	Datos del análisis de gases de escape.....	132
Tabla 37	Recursos humanos.....	136
Tabla 38	Recursos materiales.....	137
Tabla 39	Recursos tecnológicos .....	137
Tabla 40	Recurso institucional.....	138
Tabla 41	Costos del reactor de hidrógeno.....	139
Tabla 42	Costos del motor a gasolina.....	139

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama causa efecto.....	7
Figura 2	Métodos Generales de la investigación .....	14
Figura 3	Métodos específicos de la investigación .....	15
Figura 4	Efecto de los gases responsables del efecto invernadero.....	20
Figura 5	Átomo de hidrógeno .....	24
Figura 6	El hidrógeno.....	24
Figura 7	El hidrógeno como combustible del sol. ....	26
Figura 8	Aplicación aeroespacial.....	28
Figura 9	Reactor de fusión nuclear .....	29
Figura 10	Fuentes de obtención del hidrógeno .....	31
Figura 11	Modos de obtención de hidrógeno.....	32
Figura 12	Producción de hidrógeno por combustibles fósiles .....	33
Figura 13	Componentes del gas de síntesis .....	35
Figura 14	Esquema de gasificación.....	36
Figura 15	Funcionamiento de la electrólisis. ....	38
Figura 16	Demanda de energía para la electrólisis del agua y del vapor. ....	40
Figura 17	Reactor de hidrógeno.....	43
Figura 18	Sosa cáustica .....	44
Figura 19	Características de la sosa caustica .....	45
Figura 20	Diagrama de fases del agua.....	48
Figura 21	Diagrama básico de la electrólisis del agua .....	49
Figura 22	Diagrama de la molécula del agua.....	49
Figura 23	Diagrama de enlaces del agua por puente de hidrógeno.....	50
Figura 24	Motor de hidrógeno .....	55

Figura 25	Vehículo con motor de hidrógeno .....	56
Figura 26	Densidad de energía para diversos combustibles. ....	57
Figura 27	Rayado de las medidas de las placas de acero inoxidable .....	81
Figura 28	Rayado de las medidas de las placas positivas y negativas .....	81
Figura 29	Rayado de las medidas de las placas negativas y positivas de soporte ... .....	82
Figura 30	Corte de los separadores .....	82
Figura 31	Placa negativa de acero inoxidable con soporte .....	83
Figura 32	Pegado de separadores con silicona líquida .....	83
Figura 33	Placa neutra .....	84
Figura 34	Disposición de las placas .....	84
Figura 35	Disposición de los electrodos con dos placas neutras .....	85
Figura 36	Disposición de los electrodos con una placa neutra.....	85
Figura 37	Placas negativas, positivas y neutras .....	86
Figura 38	Tubo PVC (Policloruro de Vinilo) .....	86
Figura 39	Corte del tubo PVC.....	87
Figura 40	Reactores de hidrógeno principales de PVC. ....	87
Figura 41	Pegado de caucho a la tapa de PVC.....	88
Figura 42	Elementos del sistema principal. ....	88
Figura 43	Adaptador de salida de hidrógeno del mini depósito.....	89
Figura 44	Mini depósito de hidrógeno de tubo PVC.....	89
Figura 45	Burbujeador.....	90
Figura 46	Perforación del block de elementos.....	90
Figura 47	Acople de los electrodos a la tapa PVC. ....	91
Figura 48	Acople de la tapa tipo hembra al tubo PVC.....	91
Figura 49	Sistema principal del reactor de hidrógeno. ....	92

Figura 50	Esquema eléctrico.....	94
Figura 51	Elementos del sistema eléctrico .....	94
Figura 52	Esquema eléctrico funcionando $R_1$ .....	95
Figura 53	Voltímetro y amperímetro.....	96
Figura 54	Conexión eléctrica $R_1$ y $R_2$ .....	96
Figura 55	Instalación del sistema principal a la cuba electrolítica. ....	97
Figura 56	Circuito general del reactor .....	98
Figura 57	Fijación del generador del gas HHO .....	99
Figura 58	Fijación del depósito y burbujeador .....	100
Figura 59	Banco de Pruebas Villers F15 .....	105
Figura 60	Analizador de gases QGA 6000 .....	106
Figura 61	Fuerza ejercida por el motor vs velocidad. ....	111
Figura 62	Tiempo del consumo de combustible vs velocidad. ....	112
Figura 63	Consumo másico de aire vs velocidad.....	113
Figura 64	Temperatura de gases de escape vs velocidad.....	114
Figura 65	Revoluciones por segundo vs revoluciones por minuto. ....	115
Figura 66	Fuerza ejercida por el motor en función de las revoluciones. ....	116
Figura 67	Velocidad angular ejercida por el motor.....	118
Figura 68	Potencia ejercida por el motor.....	120
Figura 69	Fuerza ejercida por el motor vs velocidad .....	123
Figura 70	Tiempo del consumo de combustible vs velocidad .....	124
Figura 71	Consumo másico de aire vs velocidad .....	125
Figura 72	Temperatura de gases de escape vs velocidad.....	126
Figura 73	Número de revoluciones vs velocidad. ....	127
Figura 74	Torque ejercido por el motor en función de la velocidad .....	129
Figura 75	Potencia ejercida por el motor.....	130

Figura 76	Torque: Gasolina vs hidrógeno .....	130
Figura 77	Potencia: Gasolina vs hidrógeno .....	131
Figura 78	Resultados de la prueba de análisis de gases de escape.....	132
Figura 79	Medición del CO .....	133
Figura 80	Medición del HC .....	133
Figura 81	Medición del CO <sub>2</sub> .....	134
Figura 82	Medición del O <sub>2</sub> .....	134

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	Calor utilizado al obtener hidrógeno a partir del metano. ....	34
Ecuación 2	Calor utilizado al obtener hidrógeno a partir del CO. ....	34
Ecuación 3	Obtención del hidrógeno a partir del metano. ....	37
Ecuación 4	Reducción (cátodo). ....	39
Ecuación 5	Oxidación (ánodo). ....	39
Ecuación 6	Obtención del hidrógeno por electrólisis del agua. ....	39
Ecuación 7	Fórmula de la primera ley de Coulomb. ....	51
Ecuación 8	Suma del número de moles ....	59
Ecuación 9	Suma del número de moles ....	59
Ecuación 10	Fracción volumétrica. ....	59
Ecuación 11	Suma de Fracciones volumétricas. ....	60
Ecuación 12	Base molar del aire. ....	60
Ecuación 13	Relación aire - combustible ....	61
Ecuación 14	Relación de equivalencia. ....	62
Ecuación 15	Flujo másico de aire ....	62
Ecuación 16	Cilindrada de un motor. ....	63
Ecuación 17	Ecuaciones teóricas de combustión. ....	63
Ecuación 18	Área del rectángulo ....	64
Ecuación 19	Área del círculo. ....	64
Ecuación 20	Volumen del ortoedro. ....	64
Ecuación 21	Volumen del cilindro. ....	64
Ecuación 22	Ecuación 2.23 Ley de Faraday. ....	65
Ecuación 23	Peso equivalente. ....	65
Ecuación 24	Intensidad de corriente ....	66

Ecuación 25	Ley de los gases ideales.....	66
Ecuación 26	Torque .....	67
Ecuación 27	Potencia .....	67

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se investigó fuentes confiables bibliográficas referente a la obtención del hidrógeno - oxígeno a partir de la electrólisis del agua, su incidencia, comportamiento, normas de uso, marcas y modelos que implementan esta tecnología para su uso como un combustible alternativo. El diseño y la construcción del reactor de hidrógeno se basa en los estudios de funcionamiento correcto del motor, donde se obtiene el gas hidrógeno – oxígeno por dos reactores con electrodos de placas de acero inoxidable, un suministro de corriente proveniente de una batería de 12 voltios de corriente continua y el electrolito encargado del flujo de electrones que está formado por agua destilada y sosa cáustica. El reactor principal se lo instaló en la parte posterior de la motocicleta con todos los sistemas de generación de gas, tanque de almacenaje, filtro de agua (encargado de la purificación del gas HHO) y todo el sistema eléctrico que verifica el correcto funcionamiento del reactor. Se adapta el ingreso del gas HHO al filtro de aire ubicado antes del carburador del motor y se aprovecha el vacío generado del mismo para inyectarlo directamente en el cilindro del motor buscando su funcionamiento correcto reemplazando a la gasolina, determinando igual los parámetros característicos como: las emisiones contaminantes, el torque, la potencia del motor y el consumo de combustible, verificando los cambios que se produce en su comportamiento antes y después de que se haya suplantado a la gasolina con el hidrógeno.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **HIDRÓGENO - COMBUSTIBLE**
- **AUTOMÓVILES - COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS**
- **MOTOCICLETA SUZUKI 75 CC**
- **MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**

## **ABSTRACT**

In the present work of titration reliable bibliographic sources referring to the obtaining of hydrogen - oxygen from the electrolysis of water, its incidence, behavior, norms of use, brands and models that implement this technology for its use as an alternative fuel were investigated. The design and construction of the hydrogen reactor is based on the studies of correct operation of the engine, where the hydrogen-oxygen gas is obtained by two reactors with electrodes of stainless steel plates, a power supply coming from a 12-volt battery of direct current and the electrolyte responsible for the flow of electrons that is formed by distilled water and caustic soda. The main reactor was installed on the back of the motorcycle with all gas generation systems, storage tank, water filter (responsible for the purification of HHO gas) and all the electrical system that verifies the proper functioning of the reactor. The entrance of the HHO gas is adapted to the air filter located before the engine carburetor and the generated vacuum is used to inject it directly into the engine cylinder, seeking its correct operation replacing gasoline, determining the characteristic parameters like: pollutant emissions, torque, engine power and fuel consumption, verifying the changes that occur in its behavior before and after it has supplanted gasoline with hydrogen.

### **KEYWORDS:**

- **HYDROGEN - FUEL**
- **AUTOMOBILES - ALTERNATIVE FUELS**
- **MOTORCYCLE SUZUKI 75 CC**
- **INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

## CAPÍTULO I

# INVESTIGACIÓN DE UN REACTOR DE OBTENER HIDRÓGENO PARA UTILIZARLO COMO COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

En este capítulo se describe el problema de investigación, la contextualización a nivel: macro, meso y micro; estableciendo el objeto, campo de la investigación, la justificación y los objetivos del trabajo de investigación para determinar el uso del hidrógeno como fuente alternativa de energía en la motocicleta serie Ranger de un motor de dos tiempos a gasolina.

### 1.1. Antecedentes del problema

En la actualidad, uno de los pendientes más importantes y que no deja de ser motivo de estudio permanente de la humanidad es el abastecimiento regular de energía limpia y renovable. Se busca fuentes de energía renovables que suplan las necesidades energéticas de la población y al mismo tiempo protejan al medio ambiente.

La base fundamental de estudio no es solo buscar un reemplazo para el petróleo, sino encontrar el punto de equilibrio que el medio ambiente puede brindar, sin sobre explotar los recursos naturales que se tiene, reducir el consumo energético y mejorar la eficiencia, lo cual requiere un cambio de conciencia ambiental y tecnológica.

Erazo G. (2012) menciona: “Con el descubrimiento del petróleo y su refinación, surgieron nuevas formas de producir energía: la combustión de carburos fósiles; y gracias a esta obtención de energía, nacieron los automóviles.”

Diariamente al salir al mundo exterior de nuestros hogares se observa gran cantidad de vehículos, sinónimos de desarrollo, pero también de contaminación, mismos que son los principales responsables del deterioro ambiental, generadores de desechos

químicos dañinos para el ecosistema, como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), causantes principales del efecto invernadero.

Los residuos de la combustión de carburos fósiles tienen consecuencias que se evidencian claramente en las cifras del deterioro en la salud humana y ambiental, síntomas que son cada vez más visibles en las estadísticas por muerte de cáncer de piel, pulmón y demás enfermedades respiratorias.

Resulta de interés conocer y utilizar diferentes alternativas que permitan la producción de energía más limpia en los motores de combustión interna para reducir el índice de contaminación ambiental al que estamos expuestos, la solución a esta problemática, ocasionada por vehículos que usan combustibles derivados de petróleo, puede enfocarse particularmente al desarrollo de la evaluación del potencial energético del hidrógeno para su empleo en el motor de dos tiempos de las motocicletas como una fuente alternativa de energía en la ciudad de Latacunga con el propósito de desarrollar una propuesta para su uso en proporción para reducir la contaminación ambiental y evitar el aumento del calentamiento global.

### **1.1.1. Contextualización (macro, meso y micro)**

Desde mediados del siglo xx, de manera internacional se ha insistido en la necesidad de establecer una plataforma tecnológica que permita la producción y aprovechamiento a gran escala del hidrógeno. Esto ha aumentado ante la inminente disminución de las reservas mundiales de petróleo.

A nivel mundial, los países apoyan la utilización de energías renovables con el propósito de reducir la contaminación ambiental y así disminuir el efecto invernadero, impulsando la disminución de emisiones de CO y CO<sub>2</sub> de vehículos de transporte, desarrollando alternativas que eviten la utilización del petróleo a largo plazo aprovechando el agua salina del océano.

El hidrógeno es una realidad y en muchos países del mundo como en Estados Unidos, Europa y Japón ya ruedan vehículos impulsados por el a manera de proyecto piloto, por tal razón es motivo de estudio y desarrollo debido a que su prometedora utilización conlleva a bajar los índices de contaminación y a la disminución del calentamiento global producto de la emanación de gases de los medios de transporte.

Según Franco (2010)

En Sudamérica, especialmente en Argentina ha sido el país que más se ha preocupado de la profunda crisis petrolera que ha amenazado con poner en colapso a la generación energética global tanto así que los científicos argentinos se han tomado en serio la investigación, producción y uso del hidrógeno; así como de la creación de normas de uso del mismo.

Erazo (2012) menciona:

El uso de combustibles fósiles en el Ecuador está en constante aumento en las recientes décadas. En particular su uso en vehículos ha crecido tanto por el aumento del parque automotor como por el hecho que los combustibles fósiles presentan un subsidio en el país.

Es notable evidenciar la utilización de tres importantes combustibles como son: gasolina extra, gasolina súper y el diésel. Estos combustibles en la mayoría utilizados en motores de combustión interna en Ecuador provenientes del petróleo, así pues, como la gasolina extra y súper se utilizan en autos livianos y el diésel en vehículos livianos y pesados.

### **1.1.2. Análisis crítico.**

Es impresionante ver lo que señalan varios noticieros a nivel mundial sobre la advertencia perjudicial de la emisión de gases de efecto invernadero, gases responsables del desequilibrio terrestre, cuya consecuencia principal es el actual desorden climático alrededor del planeta. El uso inconsciente de combustibles fósiles y sus derivados con tecnología de baja eficiencia energética son una de las principales fuentes de dichas emisiones. Por esta razón, se busca fuentes de energías renovables que reemplacen a las actuales en beneficio del medio ambiente, donde se observa a la mayoría de países en la búsqueda de procesos y fuentes alternativas que generen la

energía necesaria para mantener el ritmo de vida de la sociedad moderna.

La generación de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua es un tema activo de investigación actual y se están generando avances importantes para su aprovechamiento como fuentes de energía.

Las razones para la búsqueda de energías renovables que motiven su uso a la población humana, con el afán de cambiar los suministros de energía y proteger a la naturaleza, entre los más importantes se citan:

- Es una alternativa activa de disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera.
- Al comprar productos verdes se apoya a este mercado en crecimiento y se favorece la creación de nuevos empleos en el sector de energías renovables.
- La dependencia del suministro de los derivados del petróleo bajaría; existirían un suministro constante y limpio.
- Ayudaría significativamente al cambio climático, reduciendo los niveles de emisiones.
- La sobre explotación de las reservas ecológicas disminuirían.
- Se mantendrían las reservas de petróleo.
- Se contrarrestaría el calentamiento global con energías limpias y renovables.

### **1.1.3. Prognosis.**

El agotamiento de las reservas de petróleo constituye un grave y preocupante problema, pues al ritmo actual de consumo las reservas mundiales se agotarían en menos de 5 décadas. La alta dependencia que el mundo tiene del petróleo, la inestabilidad que caracteriza al mercado internacional y las fluctuaciones de los precios de este producto, han llevado a que se busquen nuevas formas de energía más económicas y renovables como la energía solar, eólica, hidroeléctrica, biocombustibles y la obtención del hidrógeno por electrólisis.

Por el calentamiento global se producirán impactos climáticos con las siguientes consecuencias:

- Los fenómenos meteorológicos tales como: lluvias torrenciales, sequías, deshielos, tormentas tropicales (huracanes y tsunamis), olas de calor y de frío aumentarán significativamente.
- Los incendios forestales aumentarán siendo más severos y el costo de las tareas de extinción podría ser muy altos.
- El nivel del mar subirá.
- La extinción de especies y destrucción de ecosistemas.
- La acidificación de los océanos.
- Crisis sociales y económicas.
- Los mosquitos portadores de enfermedades expandirán su zona de distribución.
- Muertes humanas, animales y de plantas.

Los estudios científicos a nivel mundial dan como posible la aplicación del hidrógeno como una alternativa de energía para los motores de combustión interna a gasolina para reducir las emisiones de gases contaminantes con una producción más limpia de energía renovable en protección del medio ambiente.

#### **1.1.4. Control de la prognosis.**

En el caso del hidrógeno, los científicos opinan que es un combustible limpio, con un desempeño óptimo y que hay que utilizarlo en todo tipo de generación de energía, donde una de las ventajas más importantes derivadas del uso del hidrógeno es reducir el consumo de gasolina. Pero además esto para un país que no es del primer mundo traería beneficios económicos, ambientales y sociales.

### **1.1.5. Delimitación (temporal, espacial y contenido)**

Litardo (2014), manifiesta:

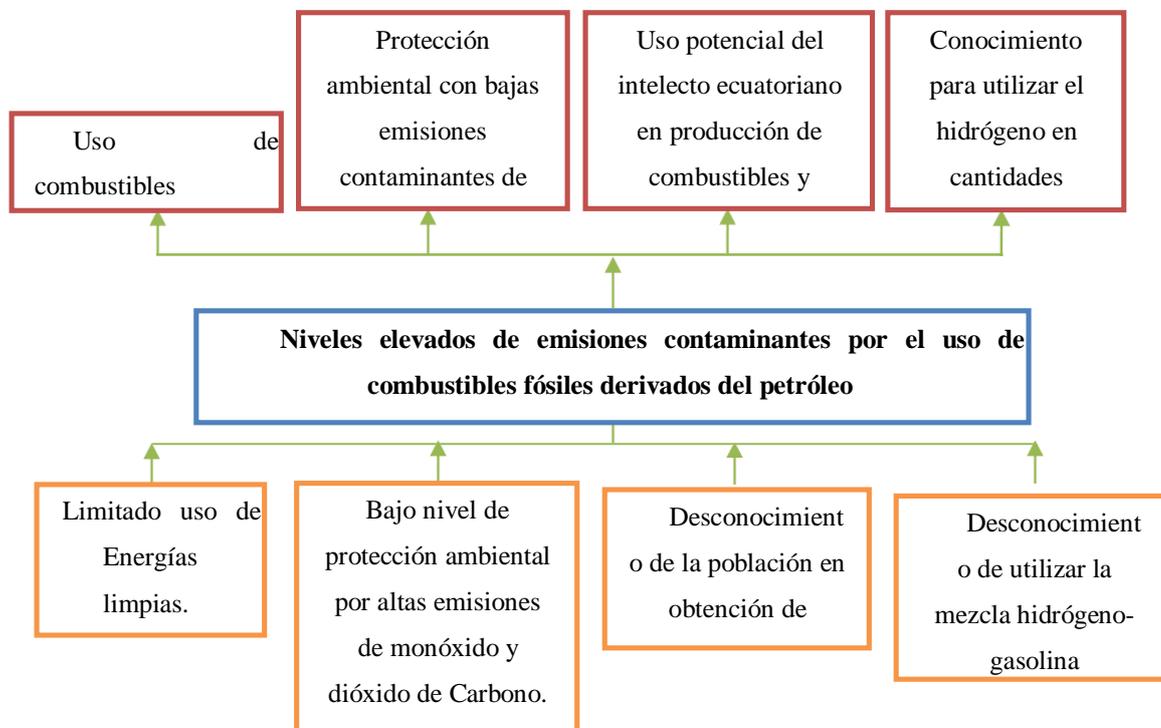
En general el hidrógeno como vector energético en el Ecuador es viable socio-ambientalmente a largo plazo ya que a pesar de ser sistemas que apoyan a la comunidad abasteciéndola de energía limpia su introducción depende mucho de decisiones políticas y por ende económicas que apoyen el cambio tecnológico de la matriz energética del país. Ya que se pudo observar que, si el Ecuador se propone generar energía eléctrica mediante hidrógeno para tener resultados de generar mínimo el 30% de energía eléctrica producida a partir de hidrógeno, para el 2050 se debe comenzar de inmediato estudios más profundos del tema para poder ir implementando e introduciendo este tipo de tecnología ya que en los primeros años no existiría una generación masiva de este tipo de energía, la misma que debe ir siendo más accesible en posteriores años. La implementación de sistemas de generación de hidrógeno a partir de energías renovables, son totalmente viables. En el aspecto social, se contribuye a concientizar sobre el uso de energía limpia, además de contribuir a la generación de empleo en caso de implementación. En el ámbito ambiental, también es viable, ya que no produce gases de efecto invernadero y por lo tanto no afecta a los factores ambientales (atmósfera, agua, suelo, componente biótico). En el aspecto económico es viable ya que el alto costo inicial de la mayoría de sistemas, puede amortiguarse a largo plazo, con mantenimiento a bajo costo. Por tanto, el hidrógeno es una solución permanente al agotamiento de los combustibles convencionales y a los problemas ambientales globales.

En la actualidad es escasa la utilización de fuentes alternativa de energía renovable como combustible en vehículos y motocicletas a gasolina en reemplazo de combustibles fósiles que permitan reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente.

### **1.2. Planteamiento del problema.**

El limitado uso de energías limpias, el bajo nivel de protección ambiental con altas emisiones de monóxido y dióxido de carbono (CO y CO<sub>2</sub>), el desconocimiento de la población en obtención de combustibles y la utilización de la mezcla hidrógeno-gasolina como combustible en motores de combustión interna a gasolina en proporciones que contribuyan a reducir las emisiones de gases contaminantes, requiere que se investigue y analice acerca de la construcción del reactor para obtener hidrógeno-oxígeno, a través de proyectos acorde con el desarrollo de las nuevas tecnologías y matrices energéticas ecuatorianas actuales.

Además, que en el Ecuador la inexistencia de proyectos relacionados a la producción de derivados de petróleo es inusuales dando como consecuencia la venta del producto básico (petróleo) a bajos costos y la compra de los derivados como la gasolina extra, gasolina súper, diésel, kerosene y demás productos a elevados precios.



**Figura 1 Diagrama causa efecto**

### 1.3. Descripción resumida del proyecto.

Se desarrolló la investigación bibliográfica referente a la obtención del hidrógeno-oxígeno a partir de la electrólisis del agua, su incidencia, comportamiento normas de uso, marcas y modelos que implementan esta tecnología.

Se establece el marco metodológico pertinente para desarrollar la investigación.

Se realiza el diseño y la construcción de un reactor para obtener el hidrógeno e inyectarlo directamente en un motor de combustión interna a gasolina de un motor de motocicleta de dos tiempos serie Ranger buscando el funcionamiento correcto del motor reemplazando a la gasolina, determinando igual los parámetros característicos

del motor como: las emisiones contaminantes, el torque, la potencia del motor y el consumo de combustible, verificando los cambios que se produce en su comportamiento antes y después de que se haya suplantado a la gasolina con el hidrógeno. Este análisis se realizó utilizando gasolina extra, súper e hidrógeno puro. El diseño considera la fuente de alimentación de 12 Voltios de corriente continua, utilizado para la activación de los electrones de las placas de acero inoxidable descomponiendo el agua en moléculas de hidrógeno y oxígeno en medio de un electrolito formado por agua y sosa cáustica.

Para las placas se utilizó acero inoxidable de 1 mm de espesor con medidas especificadas más adelante en el capítulo III en el diseño y construcción del reactor, se construyó además dos arrestallamas que son los encargados de no dejar pasar chispas que puedan causar explosión del hidrógeno en el interior del reactor conjuntamente con un purificador de hidrógeno o burbujeador, el mismo que permitirá pasar solo el elemento hidrógeno-oxígeno producido por el reactor.

Se seleccionó mangueras, válvulas, acoples y demás accesorios eléctricos que se necesitaron para la instalación del reactor de hidrógeno en la motocicleta de paseo serie Ranger de un motor de dos tiempos con funcionamiento normal a gasolina.

#### **1.4. Justificación de la investigación.**

En una época bastante difícil, con lo que a los bruscos cambios climáticos se refiere, todo esto como resultado de la irresponsabilidad propia del hombre, no se limita el uso de contaminantes atmosféricos, no se preocupa en el bajo nivel de protección ambiental que se ha dado por las altas emisiones de gases de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos nitrogenados entre otros compuestos derivados de la utilización descontrolada de la gasolina y demás derivados del petróleo, los mismos que han dañado la capa de vida y de protección humana.

Por la razón demostrada en la tabla 1 a continuación, en la actualidad la preocupación por el ambiente y la forma de protegerlo cada vez toman mayor fuerza e importancia a nivel mundial, pero a pesar de esta imperiosa necesidad, los diferentes Estados sean por conveniencias políticas y/o económicas, no logran asumir

compromisos sólidos que perduren en el tiempo, donde la falta de políticas de apoyo a empresas privadas y gubernamentales en el desarrollo de energías limpias ha marcado en las últimas décadas la inexistencia de nuevas tecnologías en beneficio del ecosistema.

Según Pérez (2010): “para un consumo de 16’480.000 toneladas de gasolina y 5’520.000 toneladas de gasóleo se producen los siguientes contaminantes en millones de toneladas”

**Tabla 1**

**Emisión de gases contaminantes al ambiente.**

	Motores de gasolina	Motores Diesel
Monóxido de carbono	7.8	0.12
Óxido de carbono	0.24	0.07
Óxido de azufre	0.013	0.04

**Fuente:** (Perez G. 2010)

En Ecuador, el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (I.N.E.C.) menciona:

En el aspecto legal en el caso concreto de Ecuador, en la actual Constitución de la República, ya existen normas que obligan al Estado a velar por un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado; y en éste ámbito, los gobiernos provinciales se constituyen en verdaderos gobiernos locales, que deben velar por el bienestar de los habitantes de su respectiva circunscripción territorial. Este decreto oficial en el marco legal constitucional ecuatoriano contribuirá a generar indicadores ambientales que permitirán visualizar el compromiso del sector público autónomo en materia ambiental. Además, permitirá ver el nivel de compromiso ambiental que presenta el Estado respecto a la problemática ambiental nacional y permitirá definir la situación actual de la gestión ambiental pública.

De la misma forma la carrera de Ingeniería Automotriz de La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L y sus líderes estudiantes están con el compromiso de buscar fuentes que ayuden a la protección del medio ambiente, responsabilidad que se asume con proyectos innovadores de energías limpias, como en el caso de este proyecto de utilizar hidrógeno en lugar de la gasolina con emisiones menos contaminantes que contribuyan a un punto de equilibrio de sana convivencia, sin tener que esperar un gobierno de turno que vele por la seguridad y tranquilidad de sus mandantes, siendo

este problema climático responsabilidad de todos.

Una responsabilidad social que obliga a pensar nuestra relación con la naturaleza, con la calidad de vida que queremos, donde las buenas prácticas ambientales se conviertan en una serie de acciones individuales y colectivas cuya finalidad sea aportar al cuidado y mejoramiento del ambiente, iniciando por el entorno más cercano, para incidir en un ámbito más global.

Es importante entender que el ser humano no solo fue creado para aprovechar y deleitarse con la naturaleza, sino que, es el responsable de su conservación, protección, mantenimiento, perdurabilidad y respeto.

Este es el punto de partida primordial de este proyecto de investigación, de la búsqueda de un nuevo combustible con cero emisiones contaminantes, de la protección al medio ambiente, del funcionamiento de un motor a base del uso del hidrógeno-oxígeno extraído por electrólisis del agua y también de las buenas prácticas ambientales, de la creación y la responsabilidad que el ser humano tiene sobre los bienes que el ambiente provee. Para cumplir con esa responsabilidad no solo hacen falta las propagandas, las campañas y la publicidad; tampoco solo el dar lecciones, hace falta mucho más: comprender, interiorizarse, amar esa responsabilidad y buscar alternativas que ayuden a la conservación de este maravilloso planeta.

En este sentido el Hidrógeno-Oxígeno representaría una alternativa de la cual se convertiría en un combustible de gran valor en el mercado internacional, ofrece buenas perspectivas comerciales actuales y a futuro.

#### **1.4.1. Interés de la investigación.**

Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [I.N.E.C.]

En el Ecuador, del total de vehículos que fueron matriculados en el 2013, los que más sobresalen son los automóviles y las motocicletas con el 32.8% y 21% respectivamente; valores que en conjunto representan el 53.8% del total de automotores a nivel nacional donde dentro de esta gama en la ciudad de Latacunga

circula las motocicletas de paseo Ranger dos tiempos a gasolina que tiene gran demanda en el sector, que será el punto de estudio para desarrollar la investigación del uso potencial del hidrógeno como fuente de energía alternativa.

#### **1.4.2. Utilidad teórica (experimental)**

Mediante el desarrollo de cálculos, mediciones y control de parámetros térmicos y mecánicos en el motor de dos tiempos de la serie Ranger se plantearon fundamentos que sustentan el uso del hidrógeno mezclado con gasolina como fuente de energía para reducir la contaminación ambiental.

#### **1.4.3. Utilidad práctica.**

En las últimas décadas se ha empezado a promocionar el hidrógeno como una alternativa de control y disminución al calentamiento global, que permitieron que a través del desarrollo experimental utilizando diversas mezclas de gasolina extra-hidrógeno, gasolina súper-hidrógeno y solo hidrógeno lograr determinar el adecuado, a fin de reducir la contaminación ambiental.

### **1.5. Objetivos**

#### **1.5.1. Objetivo general**

Diseñar y construir un reactor generador de hidrógeno para ser utilizado como combustible en un motor de combustión interna a fin de determinar los parámetros característicos del mismo.

#### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Analizar referencias bibliográficas relevantes de textos, revistas y publicaciones referidas al uso de hidrógeno en motores a gasolina.
- Seleccionar los componentes necesarios para la construcción del reactor y la futura producción de hidrógeno.
- Utilizar el hidrógeno en estado puro, así como cuando se encuentra mezclado

en proporciones con gasolina extra y súper como combustible limpio.

- Adaptar al sistema de alimentación el hidrógeno para el funcionamiento de la motocicleta de paseo Ranger.
- Utilizar el hidrógeno en el motor de combustión interna como combustible de uso automotriz.
- Disminuir las emisiones contaminantes producidas por la combustión de la gasolina para protección del medio ambiente.
- Realizar las pruebas de torque, potencia, consumo de combustible y autonomía de la motocicleta de paseo Ranger.

### **1.6. Metas**

- Bajar el índice de emisiones de gases contaminantes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO) en el ambiente en un 5% en el motor de dos tiempos de la motocicleta serie Ranger.
- Mantener el torque y la potencia necesaria para el correcto funcionamiento del motor.
- Ahorro en el gasto de combustible en un 25%.

### **1.7. Hipótesis.**

La utilización del hidrógeno obtenido del reactor permitirá disminuir las emisiones contaminantes generadas por el uso de energía fósil.

### **1.8. Variables de investigación.**

La operacionalización de variables, centra su análisis en verificar conceptos, categoría, indicadores, ítems, técnicas e instrumentos utilizados en la investigación.

### 1.8.1. Variable independiente.

Reactor de obtención de hidrógeno.

**Tabla 2**

#### Operacionalización de la variable independiente.

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Reactor:	Tecnológica	Número de placas	#	Medición	Conteo
Recipiente diseñado para que en su interior se produzca reacciones químicas.		Almacenamiento del electrolito	Litros	Medición	Vaso precipitado graduado
		Potencial eléctrico de alimentación	Voltaje	Medición	Voltímetro
		Proporción de sosa cáustica	Masa	Medición	Balanza digital

### 1.8.2. Variable dependiente.

Combustible alternativo para su uso en un motor de combustión interna.

**Tabla 3**

#### Operacionalización de la variable dependiente

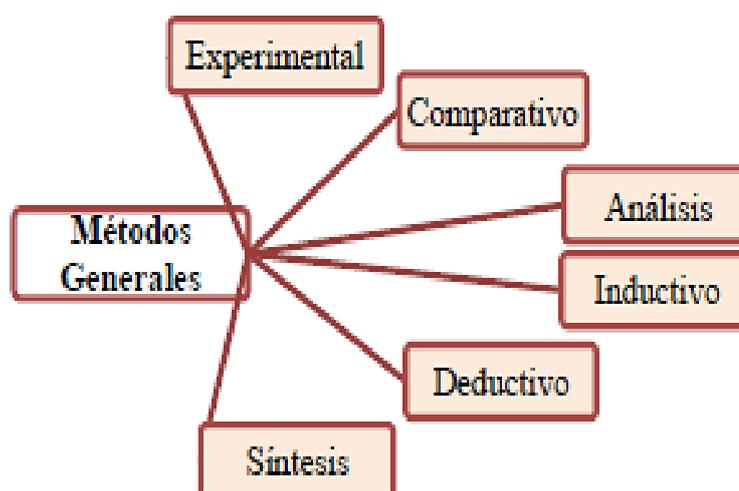
Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Combustible alternativo: Cuerpo o sustancia que puede arder o tiene tendencia a ello, sobre todo si con eso produce energía a más de cuidar el medio ambiente.	Curvas características	Torque	Nm	Medición	Dinamómetro de resistencia eléctrica
		Potencia	W	Medición	Dinamómetro de resistencia eléctrica
	Contaminación	Consumo específico	Gr/kW.h	Medición	Dinamómetro de resistencia eléctrica
		Niveles emisiones	de Ppm HC	Medición	Analizador de gases QGA - 1000

## 1.9. Metodología

La metodología es científica ya que, mediante el desarrollo de experimentos, pruebas de laboratorio y operación de variables se obtuvo resultados de: emisiones contaminantes, torque, potencia del motor y consumo de combustible, verificando los cambios que se produce en su comportamiento antes y después de que se haya suplantado a la gasolina con el hidrógeno.

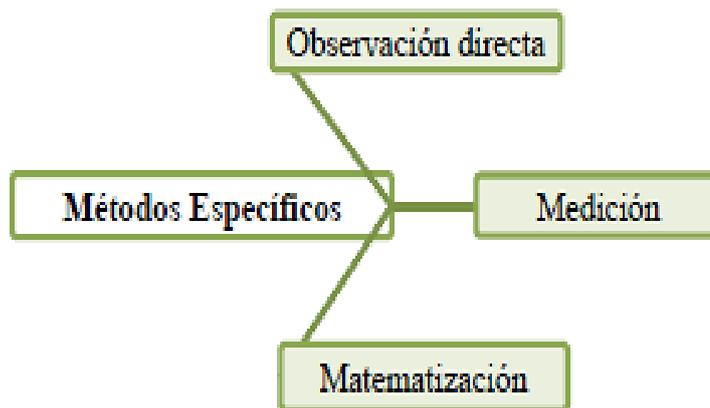
Según Ruiz R., (2007):

Existen métodos que pueden considerarse generales para todas las ramas de la ciencia en tanto que son procedimientos que se aplican en las distintas etapas del proceso de investigación con mayor o menor énfasis, según el momento en que éste se desarrolle.



**Figura 2** Métodos Generales de la investigación

De la misma manera, los métodos específicos se utilizan con más frecuencia ya que al realizar prácticas con los bancos de pruebas se está en constante medición de los parámetros característicos del motor, observación directa de los cambios o fenómenos que se producen y su respectiva matematización de los resultados.



**Figura 3 Métodos específicos de la investigación**

En el desarrollo de la investigación se utilizó los métodos siguientes:

### **1.9.1. Método experimental.**

Este método surge como resultado del desarrollo de la técnica y del conocimiento humano, a base de pruebas, en el caso de este proyecto de investigación pruebas de la motocicleta de dos tiempos serie Ranger en un dinamómetro, donde se encontró diferentes valores de torque y potencia del motor, con la finalidad de encontrar la mezcla más adecuada para que el propietario del automotor pueda verificar la eficiencia del hidrógeno de manera directa.

### **1.9.2. Método deductivo.**

Este método consiste en encontrar principios desconocidos a partir de los conocidos, esto se observa al mezclar diferentes combustibles con el hidrógeno-oxígeno de las pruebas, donde se analiza la variación de torque, potencia y emisiones de gases contaminantes como CO Y CO<sub>2</sub>.

### **1.9.3. Método inductivo.**

La investigación se pasará de resultados de observación y experimentos al planteamiento de hipótesis en una motocicleta de dos tiempos a gasolina, modelo Ranger, misma que se implementará un reactor de obtención hidrógeno, donde los

resultados y conclusiones generadas se podrán aplicar para todos los vehículos de motor a gasolina.

#### **1.9.4. Método sintético.**

El investigador sintetiza las superaciones en la imaginación para establecer una explicación tentativa, que someterá a prueba. Además, que este método se aplicará en la recopilación misma de los datos resultantes de las pruebas realizadas bajo la incidencia del reactor de hidrógeno.

#### **1.9.5. Método analítico.**

Se distinguen los elementos de un fenómeno y se procede a revisar ordenadamente cada uno de ellos por separado, aplicando este método ya que permite analizar de forma individual cada uno de los parámetros característicos (torque, potencia y consumo específico) del motor de dos tiempos de la motocicleta serie Ranger bajo la influencia del reactor de hidrógeno en la parte experimental.

#### **1.9.6. Método comparativo**

En esta investigación el método comparativo permitirá establecer variaciones de los parámetros característicos (torque, potencia y consumo específico) del motor de dos tiempos basándose en datos y mediciones realizadas en condiciones normales de funcionamiento del motor con gasolina, y con la implementación del hidrógeno.

#### **1.9.7. Método de observación directa**

Este método permitirá realizar una verificación visual de las variaciones que esta investigación busca establecer, como es la variación de gases contaminantes al introducir hidrógeno a la cámara de combustión del motor, verificando también el comportamiento del motor.

#### **1.9.8. Método de la medición.**

Para la expresión de resultados no son suficientes con los conceptos cualitativos y comparativos, sino que es necesaria la atribución de valores numéricos a dichas

propiedades. En el proyecto se adjuntan los valores obtenidos de manera numérica, como manera práctica con instrumentos de medición observando así si existe algún tipo de variación.

### 1.9.9. Método matemático

Este se aplica en cualquier investigación que asiente números de relaciones constantes, variedad de hipótesis, diversidad de comprobaciones y estas se tomen en cuenta para afirmar o negar algo, en el proyecto se pudo asumir que es un complemento del método de medición ya que con los resultados obtenidos en la práctica se observó cuan acertado estuvieron en los resultados obtenidos a base de los cálculos matemáticos aplicados a la electrólisis del agua.

**Tabla 4**

#### **Metodología, instrumentación y laboratorios.**

Metodología	Descripción	Equipos	Laboratorios
Inductivo	La investigación se pasó de resultados de observación y experimentos al planteamiento de hipótesis en una motocicleta de dos tiempos a gasolina, modelo Ranger, misma que se implementará un reactor de obtención hidrógeno, donde los resultados y conclusiones generadas se podrán aplicar para todos los vehículos de motor a gasolina.	Motocicleta con motor de dos tiempos serie Ranger. Reactor de hidrógeno.	Laboratorio de Motores ESPE matriz.
Deductivo	Encontrar principios desconocidos a partir de conocidos, esto se observa al mezclar diferentes combustibles con el hidrógeno-oxígeno de las pruebas, donde se analiza la variación de torque, potencia y emisiones de gases como CO Y CO <sub>2</sub> .	Dinamómetro Villers F15 Analizador de Gases QGA-1000 Motocicleta Ranger	Turbo Diagnostic Laboratorio de motores ESPE matriz.
Analítico	Se distinguió los elementos de un fenómeno y se procedió a revisar cada uno por separado, permite analizar de forma individual cada parámetro característico (torque, potencia y consumo específico) del motor de dos tiempos de la motocicleta serie Ranger bajo la influencia del reactor de hidrógeno en la parte experimental.	Dinamómetro Villers F15 Analizador de Gases QGA-1000 Laptop	Turbo Diagnostic Laboratorio de motores ESPE matriz.
Experimental	Este método surge como resultado del desarrollo de la técnica y del conocimiento humano, a base de pruebas, en el caso de este proyecto de investigación pruebas de la motocicleta de dos tiempos serie Ranger en un dinamómetro, donde se encontró	Dinamómetro Villers F15 Analizador de Gases QGA-1000 Motocicleta	Turbo Diagnostic Laboratorio de motores ESPE matriz.

CONTINÚA



Comparativo	<p>diferentes valores de torque y potencia del motor, con la finalidad de encontrar la mezcla más adecuada.</p> <p>En esta investigación el método comparativo permitió establecer variaciones de los parámetros característicos (torque, potencia y consumo específico) del motor de dos tiempos basándose en datos y mediciones realizadas en condiciones normales de funcionamiento del motor con gasolina, y con la implementación del hidrógeno.</p>	Ranger Reactor de hidrógeno Laptop Office	
Observación Directa	<p>Este método permitió realizar una verificación visual de las variaciones que esta investigación busca establecer, como es la variación de gases contaminantes al introducir hidrógeno a la cámara de combustión del motor, verificando también el comportamiento del motor.</p>	<p>Motocicleta Ranger Analizador de Gases QGA- 1000 Dinamómetro Villers F15</p>	<p>Laboratorio de Autotrónica Turbo Diagnostic ESPE matriz</p>
Medición	<p>Para la expresión de resultados no son suficientes con los conceptos cualitativos y comparativos, sino que es necesaria la atribución de valores numéricos a dichas propiedades.</p>	<p>Dinamómetro Villers F15 Analizador de Gases QGA- 1000 Motocicleta Ranger Osciloscopio Reactor de hidrógeno Laptop Laptop Office</p>	<p>Turbo Diagnostic ESPE matriz</p>
Matemático	<p>Este se aplica en cualquier investigación que asiente números de relaciones constantes, variedad de hipótesis, diversidad de comprobaciones y estas se tomen en cuenta para afirmar o negar algo, Matemático en el proyecto se pudo asumir que es un complemento del método de medición ya que con los resultados obtenidos en la práctica se observó cuan acertado estuvieron en los resultados obtenidos a base de los cálculos matemáticos aplicados al electrólisis del agua.</p>		

---

## CAPÍTULO II

### EL HIDRÓGENO

#### 2.1. Introducción.

En el planeta entero el uso de la gasolina en motores de combustión interna es similar a la de una persona al alimentarse diariamente, hoy en día el vehículo ya no es un lujo, es una necesidad, es tan indispensable el uso del parque automotor por el desarrollo que este brinda ya sea en movilidad de las personas o en movilidad de materia prima para las industrias, pero el gran problema no está en el uso del automotor sino en las emisiones finales que resultan luego de utilizar los derivados del petróleo en el interior de un motor de combustión interna.

Según Erazo G. (2012) “El 50% de la energía producida en el mundo es consumida por vehículos automotores, lo que hace del automóvil individual el primer causante del efecto invernadero o cambio climático”.

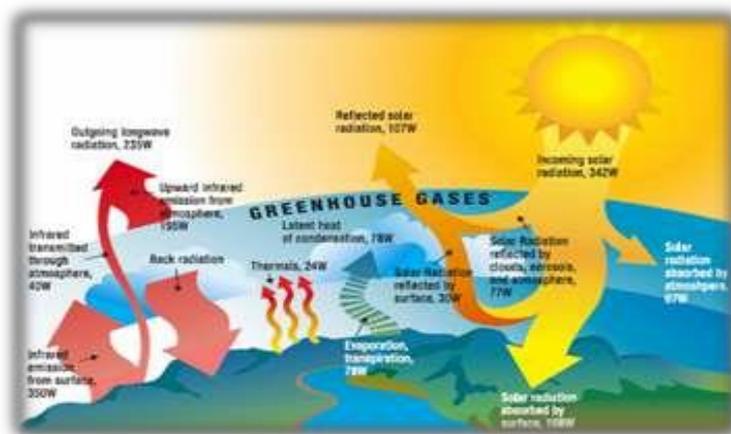
La gran preocupación actual es la escasez de combustibles que otorguen cero emisiones contaminantes y el alto costo de la energía renovable, los fabricantes de automóviles tienen la tentación de mirar hacia las fuentes más abundantes de energía. Siendo el más importante en el universo por cantidad el hidrógeno, por ello, siempre se ha fantaseado con que los fabricantes de automóviles lo utilicen en el futuro como un combustible ecológico que no posee ningún problema en su rendimiento, eficiencia, manteniendo cero emisiones contaminantes.

En los últimos años se promociona al hidrógeno como una alternativa válida de uso, para contrarrestar las emisiones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) donde estos residuos constituyen el principal causante de la emisión de gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento que sufre el planeta.

Morlanes N. (2007), menciona:

El enorme impacto que ocasiona el uso de los combustibles fósiles como fuente de energía sobre el planeta, unido al incremento del coste del petróleo y la dependencia energética del mismo, son factores que aceleran el interés en modificar y diversificar las fuentes de energía. Esta alarma ha empujado a los gobiernos de los países industrializados a revisar sus políticas energéticas y sus estrategias con el doble propósito de mejorar la seguridad en el suministro y reducir las emisiones de los gases responsables de efecto invernadero.

Por tanto, ya sea desde un punto de vista económico como desde un punto de vista político, la estrategia, a medio y largo plazo, de diversificación y acomodación a los nuevos requerimientos sociales, empuja a la profundización y desarrollo de nuevas fuentes de energía.



**Figura 4 Efecto de los gases responsables del efecto invernadero.**

Fuente: (Morales S, 2007)

En el estudio de los problemas derivados del uso del petróleo como fuente de energía, y también como fuente de contaminación, muchos grupos científicos están investigando los medios para mejorar la producción de energía con un nivel mínimo de efluentes tóxicos. En los últimos años, han aparecido un gran número de publicaciones que se ocupa de las diversas opciones existentes como fuentes de energía más limpias, sus ventajas, desventajas y aspectos económicos. Entre las distintas alternativas propuestas existe un nexo común: a largo plazo, el hidrógeno parece ser el combustible más conveniente ya que tiene la ventaja de que su combustión es limpia, permitiendo la generación de cualquier fuente imaginable de energía y con posibilidad también de almacenamiento.

El hidrógeno es un portador de energía limpio. Durante su combustión los únicos productos son calor y agua. Cuando se utiliza como combustible en las pilas de combustible, permite alcanzar eficiencias energéticas más elevadas que las obtenidas con motores de combustión interna. Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que presentan la propiedad de transformar la energía de una reacción química en energía eléctrica de forma eficiente, limpia y además pueden ser flexibles en el tipo de combustible requerido, utilizando tanto en unidades portátiles como estacionarias (p. 17)

Así, el hidrógeno responde a una visión de futuro, donde la aportación de este gas generado de forma limpia y económica, serviría para alimentar las necesidades energéticas de la sociedad. Esta propuesta reduciría la dependencia actual sobre los combustibles fósiles, ya que el hidrógeno podría ser generado a partir de una fuente primaria como la renovable. Igualmente se disminuiría la contaminación atmosférica y la emisión de gases de efecto invernadero, puesto que el único residuo generado por el hidrógeno es agua.

El alto precio del petróleo, las consecuencias del uso del petróleo y la dependencia al uso de los derivados del mismo ha propiciado que a través de investigaciones que son posibles generarlas a través de proyectos de tesis de las universidades, orienten su esfuerzo a la búsqueda de fuentes alternativas de energía que cubran las necesidades energéticas en este aspecto a nivel nacional; ya que el uso de energías renovables se plantea como una opción con muchas posibilidades de desarrollo.

Problemas como la falta de un sistema de gestión de energías, baja utilización de energías alternativas, contaminación, efecto invernadero pueden ser solucionados a través del uso del hidrógeno, siendo este una fuente de uso potencial de energía renovable que se manifiesta en decisiones generales que irá marcando el futuro de las naciones.

Montes, Abánades & Martínez (2010), dicen: “De cara a un futuro basado en un desarrollo sostenible, el vector energético hidrógeno, producido a partir de energías renovables, está adquiriendo cada vez más protagonismo” (p. 1).

## 2.2. Razones para el uso del hidrógeno.

Es verdadero el uso del hidrógeno como combustible en unión con la gasolina, donde este combustible híbrido constituye una de las fuentes de energía limpia y renovable que en un futuro se tiene dentro del panorama actual. Su seguridad, fiabilidad, limpieza y eficiencia hacen del uso del hidrógeno una alternativa a considerar en los proyectos de investigación y desarrollo orientados a las energías renovables, Según Hurtado J. & Soria B., (2007). Las razones son muy poderosas:

- **Razones de dependencia energética.** En la actualidad hay una fuerte dependencia de los combustibles fósiles, de los que quedan cantidades finitas. Así, las reservas de petróleo se estiman en 40 años, las de gas natural en 60 y las de carbón en 200. Esta limitación de reservas va unida en muchas ocasiones a una elevada concentración de los yacimientos (muy elevada en el caso del petróleo, menor en el del gas natural y reducida en el caso del carbón), lo que facilita presiones políticas por parte de los países productores. Estas dos circunstancias obligan a volver la vista hacia otras fuentes energéticas: renovables y nuclear. Si bien el hidrógeno no es una fuente energética sí facilita el transporte y almacenamiento de ellas, y puede ser producido a partir de fuentes renovables y nucleares, por lo que puede jugar un papel importante en cuanto a la reducción de la dependencia energética, que también se ve favorecida por el elevado rendimiento en la conversión.
- **Razones medioambientales.** Aunque de manera indirecta las razones anteriores repercuten de manera favorable en el medio ambiente, existe una ventaja adicional para el uso con fines energéticos del hidrógeno: su combustión sólo libera vapor de agua, libre de CO<sub>2</sub>. Esto supone que si en el proceso de producción no se ha emitido CO<sub>2</sub> (habiendo varias alternativas para ello), la producción de energía a partir de hidrógeno está libre de emisiones contaminantes, siendo un importante contribuyente a la protección ambiental de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- **Razones de eficiencia energética.** La energía química del hidrógeno puede

ser utilizada en mezcla con la gasolina para reducción de gases de efecto invernadero, mejorando el quemado de la combustión. El uso del hidrógeno producido puede emplearse tanto con fines estacionarios (energía final para consumidores industriales, domésticos y de servicios) como con fines de transporte, mediante su uso en vehículos de motores de combustión interna. (p. 26).

Además, Morlanes N. (2007), señala:

El hidrógeno tiene la posibilidad de revolucionar el modo en el que producimos y usamos la energía. En este sentido, la investigación y el desarrollo de las tecnologías de producción de hidrógeno, de las infraestructuras necesarias para su uso y la educación del público para su aceptación, juegan un papel muy importante para alcanzar una economía basada en el hidrógeno, es decir, en el uso del hidrógeno como portador de energía y de las pilas de combustible como dispositivos de transformación de energía. El hidrógeno y las pilas de combustible son una opción que ofrece una alternativa limpia y eficiente para cubrir las necesidades energéticas de la sociedad actual (p. 18).

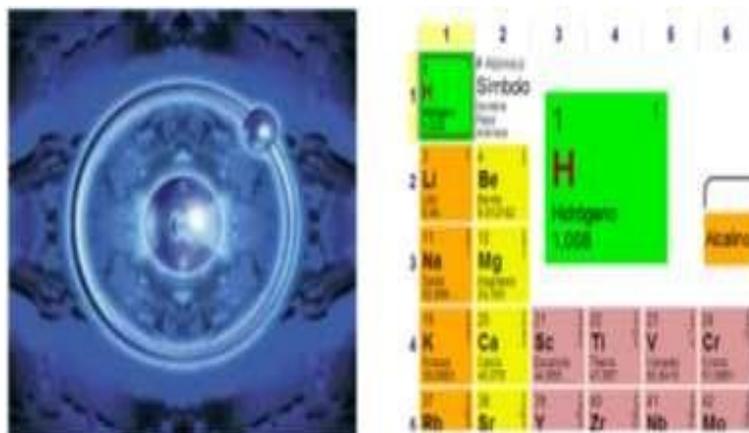
### **2.3. Características del hidrógeno.**

Según Aguirre O.,(2013):

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, es un gas incoloro, no huele ni tiene color, está compuesto por moléculas diatómicas, es el número uno en la tabla periódica tanto en fila como en columna lo que nos indica que solo tiene una órbita y solo tiene un electrón en ella es por ello que se forman las moléculas diatómicas, su símbolo es la letra H y el hidrógeno se representa por  $H_2$  su número atómico es 1 y un peso atómico de 1.00797, tiene una densidad de 0.071g/ml su punto de ebullición es a  $-252.7^{\circ}C$ , su punto de fusión es de  $-259.2^{\circ}C$ . Se convierte en líquido a presión atmosférica aproximadamente por debajo de los  $20.39^{\circ}K$  y a  $20^{\circ}K$  su densidad es de  $76.4 \text{ kg/m}^3$  que es 850 veces mayor que la del hidrógeno en condiciones normales lo que permite confinarlo en recipientes no muy voluminosos y ahorrar espacio en su almacenamiento.

Es un gas difícilmente licuable (el más difícil después del helio), con la particularidad de que al expandirlo se calienta. Se transporta por tuberías y en contenedores a presión, su compresión es muy peligrosa, pues cualquier fuga puede ocasionar atmósferas explosivas. La licuación del hidrógeno puede hacerse con ayuda de nitrógeno líquido.

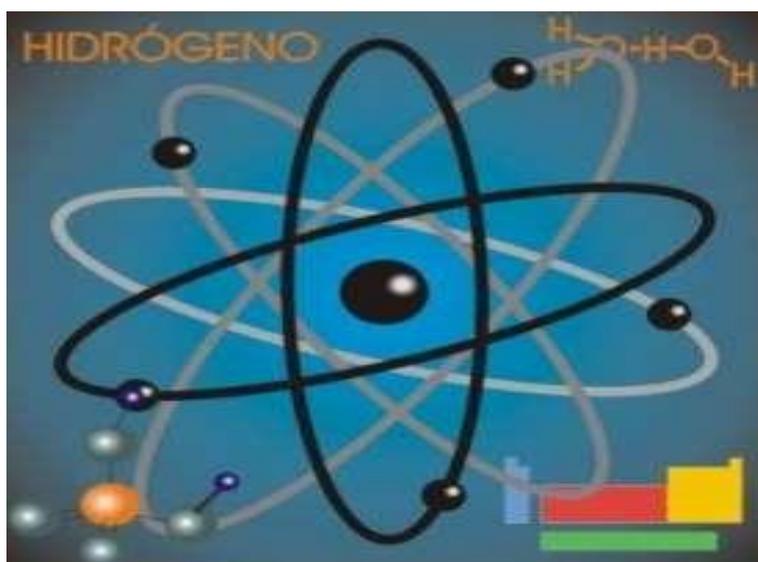
El isótopo del hidrógeno más común en la naturaleza, es conocido como protio, tiene un solo protón y ningún neutrón. El hidrógeno puede adquirir carga positiva convirtiéndose en un catión llamado hidrón  $H^+$  o carga negativa convirtiéndose en un anión conocido como hidruro,  $H^-$ .



**Figura 5**      **Átomo de hidrógeno**

**Fuente:** (Aguirre G, 2013)

Los compuestos que integra el hidrógeno se denominan hidruros, formando minerales, ácidos y bases. El Sol está compuesto en su mayor parte por hidrógeno. Solamente es reactivo a temperaturas altas. La luz que emana de las estrellas al igual que su energía es provocada por la fusión de átomos de hidrógeno que originan el helio, liberando en el proceso mucha energía”.



**Figura 6**      **El hidrógeno**

**Fuente:** (Aguirre G, 2013)

Ponce (2001) complementa:

El hidrógeno como el elemento más ligero que existe y muy abundante en la tierra, constituye aproximadamente el 75% de la materia del universo, pero se encuentra combinado con otros elementos por lo que no es un combustible que pueda tomarse directamente de la naturaleza, sino que es un vector energético. Por lo que, para liberar de forma controlada la energía que almacena se ha de generar mediante otros componentes químicos. Un kilogramo de hidrógeno puede liberar más energía que un kilogramo de cualquier otro combustible (casi el triple que la gasolina o el gas natural), y para liberar esa energía no emite nada de dióxido de carbono, tan sólo vapor de agua, por lo que el impacto ambiental es nulo.

**Tabla 5**

**Abundancia promedio en la Tierra de isótopos estables.**

Elemento	Isótopo	Abundancia promedio en la Tierra (%)
Hidrógeno	$^1\text{H}$	99.985
	$^2\text{H}$ o D	0.015
Carbono	$^{12}\text{C}$	98.89
	$^{13}\text{C}$	1.11
	$^{16}\text{O}$	99.759
Oxígeno	$^{17}\text{O}$	0.037
	$^{18}\text{O}$	0.204
Nitrógeno	$^{14}\text{N}$	99.63
	$^{15}\text{N}$	0.37
	$^{22}\text{S}$	95.0
Azufre	$^{23}\text{S}$	0.76
	$^{24}\text{S}$	4.22
	$^{25}\text{S}$	0.014

Reyes & Andrade, (2007) mencionan: “El hidrógeno posee tres isótopos, dos de ellos son estables y uno es radioactivo:

- Protio: Consta de un protón y un electrón, y es el isótopo más abundante con el 99.985%.
- Deuterio: Consta de un protón y un electrón en el núcleo, y un electrón orbitando, es extremadamente escaso, con tan solo menos del 0.015%.
- Tritio: Es el isótopo más grande de hidrógeno conocido, con dos neutrones y un protón en el núcleo, posee un solo electrón. Es radioactivo y tiene un tiempo de vida media de 12.3 años.

Se denomina isótopos a los átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones, y por lo tanto, difieren en número másico. En química, el número másico o número de masa es la suma del número de protones y el número de neutrones del núcleo de un átomo”

Aguirre O., (2013) complementa:

El hidrógeno es uno de los elementos más abundantes en todo el universo, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia, uno de los principales elementos que constituyen el agua y de toda materia orgánica. Es el combustible para producir la energía que el sol emite a nuestro sistema solar; en el sol se producen reacciones de fusión en la que la enorme presión del centro, combinado con las altas temperaturas hace que el hidrógeno se transforme en helio, produciéndose la energía que irradia gracias al hidrógeno que se quema



**Figura 7** El hidrógeno como combustible del sol.

**Fuente:** (Aguirre G, 2013)

**Tabla 6**  
**Propiedades del hidrógeno**

Propiedades generales del hidrógeno	
Punto de fusión	-259,1 °C
Punto de ebullición	-252,7 °C
Temperatura crítica	-239,8 °C
Densidad del líquido	0,0709 g/cm <sup>3</sup>
Densidad del gas	0,0899 Kg/m <sup>3</sup>
Solubilidad en el agua (en 100 partes)	A 0°C : 2,1 cm <sup>3</sup>
	A 80°C : 0,85 cm <sup>3</sup>
Parámetros de seguridad	
Límites de inflamabilidad en el aire, % de volumen	4,0 – 75,0
Límites de detonación en el aire, % de volumen	18,3 – 59,0
Límites de inflamabilidad en oxígeno, % de volumen	4,5 – 94,0
Límites de detonación en oxígeno, % de volumen	15,0 – 90,0

Fuente: (Gutiérrez, 2005)

#### 2.4. El hidrógeno en la industria aeroespacial y experimental.

Starr Robert M. (2006) señala:

El hidrógeno líquido es el elemento que comúnmente se usa como combustible en la industria aeroespacial para impulsar sus motores, donde se suele abreviar como LH<sub>2</sub>, ya que en la naturaleza se encuentra en forma molecular H<sub>2</sub>. El hidrógeno líquido también es un método de preservación utilizado en la mayoría de los laboratorios criogénicos, al permitir congelar sustancias casi de inmediato sin dañar las células.

El hidrógeno existe en abundancia en nuestro Sistema Solar, y podría permitir que una nave espacial de energía VASIMR, pudiera lanzarse con el combustible suficiente para llegar a su destino. Luego, acumularía allí más hidrógeno como propulsor para el viaje de regreso. Según la NASA, un vuelo de VASIMR a Marte tomaría un poco más de tres meses, comparado con los seis a nueve meses que necesita un cohete convencional de propulsión química.



**Figura 8 Aplicación aeroespacial**

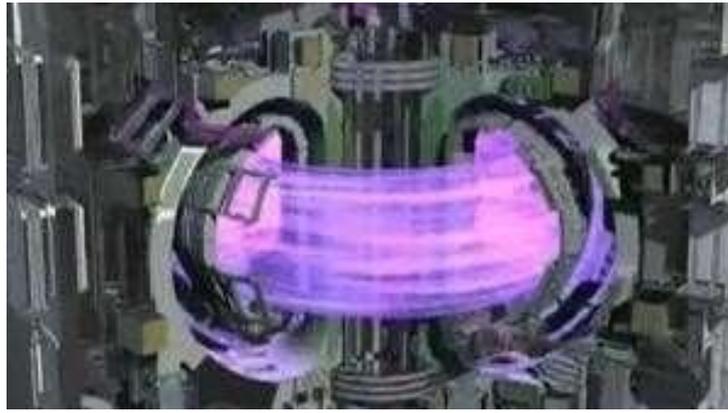
**Fuente:** (Starr Robert M., 2006)

El Motor a Reacción Común Criogénico y Extensible (Common Extensible Cryogenic Engine o CECE, por sus siglas en inglés) utiliza como combustible una mezcla de oxígeno líquido a  $-297$  grados Fahrenheit e hidrógeno líquido a  $-423$  grados Fahrenheit. Cuando el motor quema estos combustibles gélidos, se produce un gas compuesto de vapores calientes que impulsan el inyector, creando tracción. El inyector frío del motor enfría el vapor que se condensa y después se congela en la salida del inyector, formando carámbanos.

Aguirre O., (2013) menciona:

También se utiliza para obtener la reacción de fusión que es una tecnología que trata de revolucionar la generación de energía ya que intenta imitar la reacción que se lleva a cabo en el sol que se trata de fusionar dos formas de átomos de hidrogeno el deuterio que se obtiene del agua del mar y el tritio que se puede obtener del litio. Lo que se pretende es unir los núcleos de deuterio y del tritio al unirse liberan una gran cantidad de energía, pero para lograr esto se necesita una gran cantidad de energía, en el sol se necesitan 15 millones de grados para que se fusionen pero una gran parte de esa energía la aporta la enorme presión a la que están sometidos, en Europa en el reino unido, se alcanzan 170 millones de grados por lo que ningún material podría soportar tal temperatura, así que lo que mantiene ese plasma es un campo eléctrico muy poderoso que mantiene el plasma.

Esta tecnología lleva décadas en la cual están trabajando en conjunto varias naciones.



**Figura 9** Reactor de fusión nuclear

**Fuente:** (Aguirre G, 2013)

Actualmente se está construyendo el ITER al sur de Francia, se pretende que este reactor de fusión nuclear esté terminado para el 2018 y pueda estar en funcionamiento en la red eléctrica para el 2030, sin embargo, no es seguro que esto se lleve a cabo, por la dificultad de esta tecnología es prácticamente una apuesta en la cual están involucrados muchos países y en la que se han invertido muchos recursos.

## **2.5. Producción de Hidrógeno.**

En los últimos años la producción de hidrógeno ha sido un asunto de gran importancia, la protección ambiental que este elemento puede brindar al planeta es de mucho interés, recientemente ha aumentado el interés aún más por los procesos de producción del mismo, motivado por los avances espectaculares obtenidos en la tecnología relacionada con el uso del hidrógeno mezclado con la gasolina en la combustión del motor.

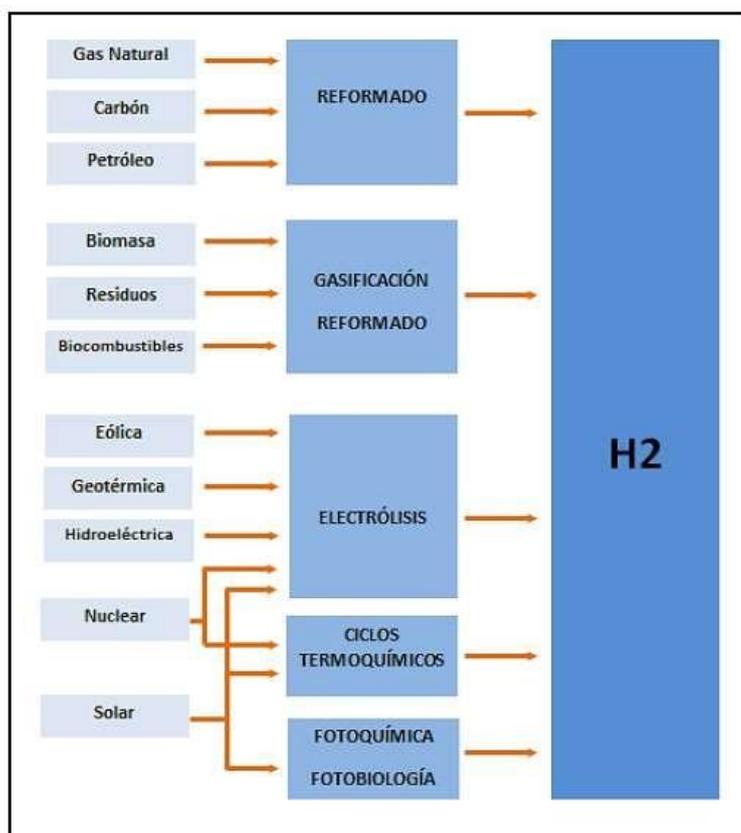
Sánchez & Faus (2007), mencionan:

El hidrógeno es un portador de energía limpio. Así, como se ha indicado anteriormente, el hidrógeno ofrece un combustible no contaminante y eficiente para cubrir las demandas energéticas crecientes actuales. Estas propiedades del hidrógeno como portador de energía y combustible no contaminante hacen de él un elemento prometedor para mantener la seguridad del sistema energético desarrollado en la actualidad.

- El hidrógeno es un portador de energía, no una fuente de energía. El hidrógeno puede almacenar y dispensar energía útil, pero no existe típicamente por sí mismo en naturaleza, sino que se obtiene a partir de los compuestos que lo contienen (agua, hidrocarburos, alcoholes o biomasa).
- El hidrógeno se puede producir usando diversos recursos energéticos, incluyendo energía nuclear, gas natural y carbón, también otras energías renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica, o geotérmica.
- El hidrógeno se puede producir a partir de diferentes tecnologías: procesos térmicos o catalíticas (reformado de gas natural o de otros hidrocarburos, procesado de materias renovables como bio-aceites, gasificación de biomasa o de carbón), procesos electrolíticos (electrolisis del agua), y fotolíticos (a partir del agua usando la luz solar mediante materiales biológicos y electroquímicos).
- Para asegurar la producción de una energía limpia, lo más interesante sería desarrollar tecnologías de producción de hidrógeno a partir de materias primas renovables (ej: biomasa) mediante procesos que den lugar a emisiones de gases responsables del efecto invernadero netas cercanas a cero y que utilicen fuentes de energía renovable (solar, eólica, hidroeléctrica o geotérmica). Para cubrir nuestras necesidades energéticas totales, el rendimiento energético del proceso es otro aspecto muy importante.
- El hidrógeno puede producirse en instalaciones grandes (producción centralizada, localizada a 80-500 Km del punto de uso), medianas (producción semi- centralizada, localizada a 40-160 Km del punto de uso) y pequeñas (producción distribuida, situada cerca o en el punto de uso).
- Para que el hidrógeno pueda introducirse en el mercado actual, debe ser competitivo en coste con las alternativas disponibles. En el mercado de transporte, por ejemplo, vehículos ligeros, esto significa que los vehículos basados en pila de combustible de hidrógeno deben tener el mismo coste para el consumidor que un vehículo convencional con motor híbrido o de combustión interna.
- Actualmente están en período de investigación y desarrollo una gran variedad de tecnologías de producción de hidrógeno. Algunas están más desarrolladas que otras y pueden ser competitivas en coste para el período de transición (que comienza en el año 2015), mientras que otras se consideran tecnologías a largo plazo (pudiendo ser competitivas en coste a partir del año 2030)". (p.20).

Según Llorca (2010):

Existen un gran número de métodos para producir hidrógeno, con grandes diferencias entre ellos, esto se debe principalmente a la materia prima con la que se pretende descomponer el agua, esto al propio proceso de producción o a la tecnología asociada al proceso.



**Figura 10 Fuentes de obtención del hidrógeno**

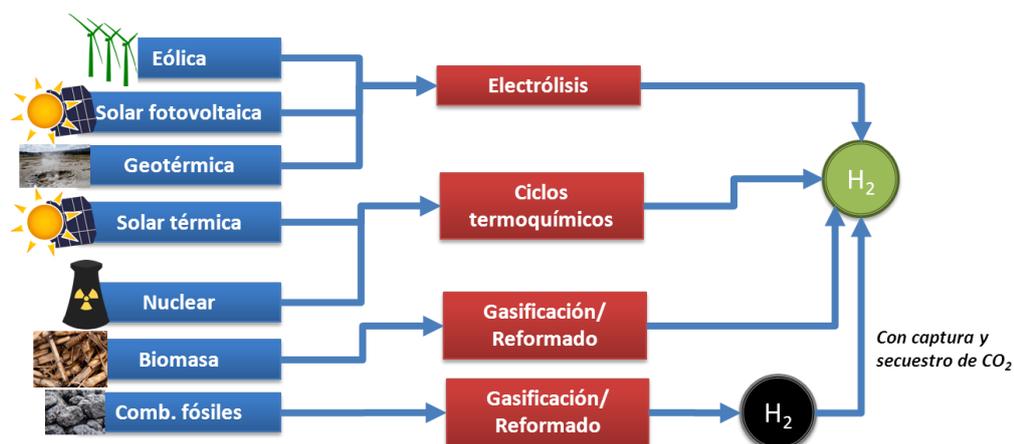
Fuente: (Llorca, 2010)

Hoy en día el 96% del hidrógeno producido requiere como energía primaria combustibles fósiles, siendo el 95% de la producción (en torno a 65 millones de toneladas anuales), donde este se produce para el consumo propio de las industrias que lo demandan. Lamentablemente esta práctica diaria de consumo de estos tipos de combustibles produce emisiones contaminantes a la atmósfera.

A continuación, se describen los principales métodos de producción de hidrógeno en función de la materia prima empleada en el proceso. La problemática energética actual, que motiva la búsqueda de una economía del hidrógeno, ha promovido los esfuerzos hacia el desarrollo de metodologías de producción de hidrógeno alternativas, que respeten el medioambiente. Una de las más prometedoras es la producción termodinámica a partir del agua, que en un futuro podrían contribuir de forma significativa a la satisfacción de la demanda de hidrógeno como vector energético”.

Creus A, (2009) añade:

El hidrógeno puede obtenerse de varias formas:



**Figura 11 Modos de obtención de hidrógeno**

Fuente: (Creus, 2009)

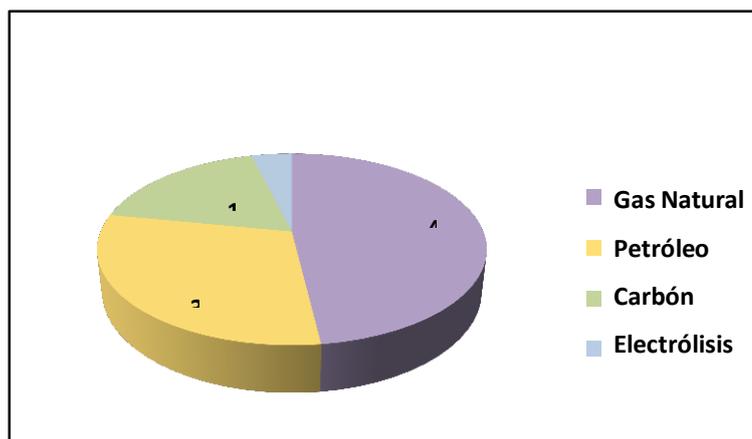
De los 670 billones de Nm<sup>3</sup> de hidrógeno (60 millones Tm) que se producen anualmente en todo el mundo, la mayor parte proviene del gas natural y del petróleo o son subproductos de la industria química (PVC, electrólisis).

El hidrógeno, aunque es un elemento muy abundante en la naturaleza no se encuentra en forma natural, siempre está combinado con otros elementos así que no existen yacimientos como el petróleo o el gas natural por lo que debe ser sometido a diversos tratamientos para poder separarse.

El hidrógeno se puede producir usando diferentes tecnologías como pueden ser procesos térmicos o catalíticos (reformado de gas natural o de diferentes hidrocarburos), de los procesos electrolíticos como la descomposición del agua y también fotolíticos (a partir del agua utilizando el sol mediante materiales biológicos y electroquímicos).

La mejor opción en relación al medio ambiente sería la producción del hidrógeno con una energía limpia, utilizando materias primas renovables como la biomasa cuyas emisiones de gases de efecto invernadero sean cercanas o iguales a cero o se utilicen fuentes de energía renovable como la solar, eólica, hidroeléctrica o geotérmica.

Para que el hidrógeno tenga un gran auge en el mercado actual, aunque es necesario para diversos procesos, desde el enfoque de producción de electricidad debe ser competitivo en relación con las alternativas actuales en términos de coste. Aunque por otro lado sus costos de producción son relativamente más bajos comparados con los procesos en los que se producen pocas o casi nulas cantidades de estos gases.



**Figura 12 Producción de hidrógeno por combustibles fósiles**

Fuente: (Llorca, 2010)

En la figura 12 puede comprobarse que actualmente las fuentes no renovables utilizadas para la generación de hidrógeno abarcan un 96% de la generación total, mientras que solo un 4% de este gas es producido con fuentes renovables". (p.125).

### 2.5.1. Producción distribuida

Sánchez & Faus (2007), mencionan:

El hidrógeno se puede producir en plantas de mediana capacidad en el punto estratégico donde es necesario. Por ejemplo una estación de servicio para recargar el combustible; este tipo de distribución puede ser el acercamiento a corto plazo más viable para introducir el hidrógeno, en parte a que la demanda inicial será baja. Dos de las principales maneras de obtener el hidrógeno podrían ser el reformado del gas natural o de combustibles líquidos tales como el petróleo, el bio-etanol o bioaceite y otro es la electrólisis del agua pero en menor proporción, ya que es más costosa aunque se pretendería cambiar esa proporción ya que esta última no produce residuos contaminantes

### 2.5.2. Producción centralizada.

Según Aguirre O., (2013):

En un plazo mayor (largo plazo) las instalaciones de producción centralizada que aprovechan de la economía a gran escala serán necesarias para responder a la gran demanda prevista de hidrógeno, aunque esta requerirá mayor inversión e infraestructura tanto de instalaciones como de transporte.

Las tecnologías de la producción del hidrógeno se clasifican en tres categorías generales:

- Procesos térmicos
- Procesos electrolíticos
- Procesos fotolíticos

### 2.5.3. Procesos térmicos.

En estos procesos se utiliza la energía de recursos como gas natural, carbón o biomasa para obtener hidrógeno que forma parte de su estructura molecular.

### 2.5.4. 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 (“steamreforming”) 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 electrolisis el 4%, datos obtenidos del documento “Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica” de la universidad de Sevilla:



**Ecuación 1 Calor utilizado al obtener hidrógeno a partir del metano.**

**Fuente:** (Sánchez & Faus, 2007)

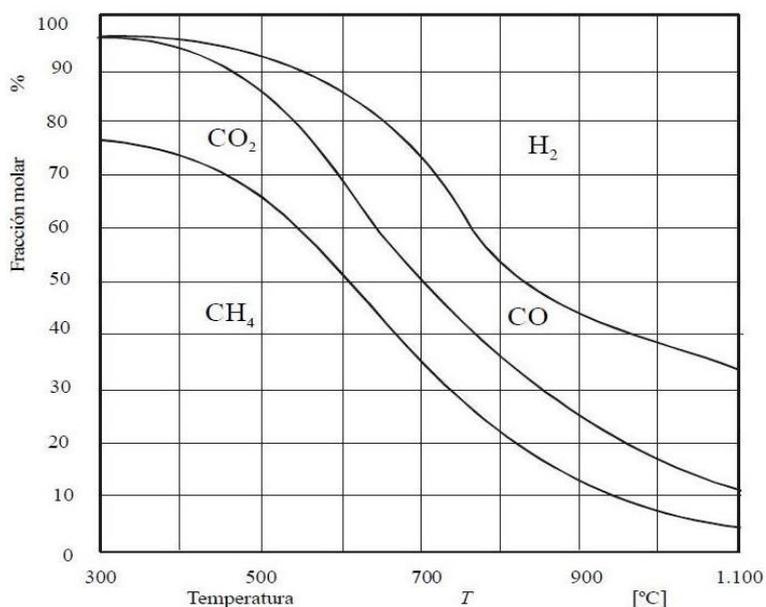


**Ecuación 2 Calor utilizado al obtener hidrógeno a partir del CO.**

**Fuente:** (Sánchez & Faus, 2007)

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  $CH_4$ , 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  $800^\circ C$  que son inyectados a la mezcla, procurando la máxima conversión de metano, como se puede observar en el diagrama siguiente:



**Figura 13** Componentes del gas de síntesis

Fuente: (Aguirre G, 2013)

Para aumentar la velocidad de reacción se utilizan catalizadores de níquel para maximizar 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  $500^\circ C$ , en presencia de catalizadores de óxidos de hierro y cromo o a menores temperaturas con catalizadores de zinc/cobre. Para producirse un alto volumen de hidrogeno, esta se realiza a presión de 28 a 36 bares para evitar la necesidad de comprimir el hidrógeno producido”

### 2.5.5. Gasificación.

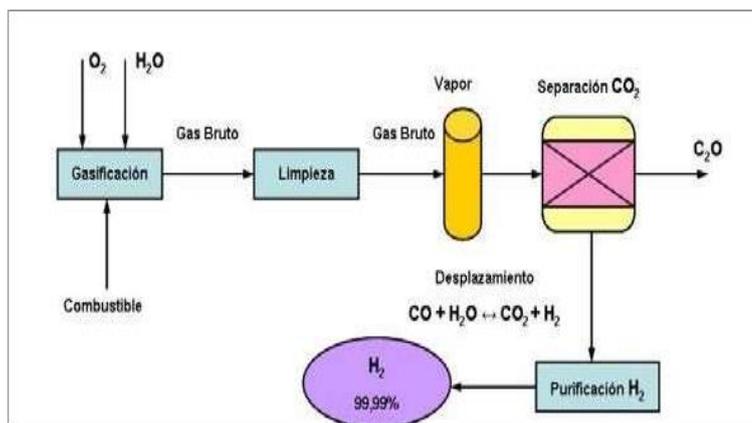
Según Aguirre O., (2013):

La gasificación del carbón y de fracciones pesadas del petróleo es un proceso que consiste en la combustión con ausencia de oxígeno en la que se obtiene monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano en diversas cantidades 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 gasificación puede aplicarse tanto a la biomasa como al carbón.

Cuando se introduce aire en la reacción se obtiene un gas 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 algo de oxígeno y dióxido de carbono.

Para obtener hidrógeno es necesario aplicar una reacción de desplazamiento sobre el gas anteriormente mencionado. Ahora si lo que se agrega a la reacción es oxígeno y vapor de agua lo que se obtiene es un gas de síntesis que contiene hidrógeno y monóxido de carbono y este gas puede ser utilizado para producir el propio hidrógeno y además combustibles líquidos como lo es el metanol.

Por lo que es una mejor opción, aunque más costosa utilizar oxígeno y vapor de agua en la reacción. En la siguiente figura se muestra un esquema elemental del proceso de gasificación. Una vez limpiado de compuestos de azufre y cenizas, el gas obtenido después del proceso de gasificación se somete a una reacción de desplazamiento dando como resultado una mezcla de hidrógeno y dióxido de carbono. Al final del proceso el hidrógeno y el dióxido de carbono se dividen y para obtener solo el hidrógeno en concentraciones de 99.99%



**Figura 14** Esquema de gasificación

Fuente: (Aguirre G, 2013)

### 2.5.6. Pirólisis.

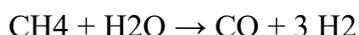
Aguirre O., (2013) menciona:

La pirólisis se trata de la descomposición de un combustible sólido ya sea carbón o biomasa mediante la acción de calor donde normalmente esto ocurre a 450°C para la biomasa y 1200°C para el carbón pero en ausencia de oxígeno. Los productos finales de este proceso dependen de las características del combustible, temperatura de la presión y de la cantidad de tiempo en que están sometidos a este proceso los productos finales que se pueden obtener son:

- Gases compuestos por hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos.
- Líquidos hidrocarbonados.
- Residuos carbonosos, también llamado coque.

Como el interés es producir hidrógeno interesa controlar la reacción para que se produzca un gas de síntesis que posteriormente, pueda separarse mediante la reacción de desplazamiento y un proceso de purificación, similar a las dos últimas fases del método de reformado con vapor de gas natural.

La pirolisis se ha utilizado desde hace tiempo (arco eléctrico-1969) para obtener el llamado gas de hulla o gas de coque que mediante calor se obtiene la siguiente reacción:



#### **Ecuación 3 Obtención del hidrógeno a partir del metano.**

**Fuente:** (Sánchez & Faus, 2007)

La hulla se introduce en un horno pirolítico en el que en ausencia de oxígeno a 1200°C se descompone en carbón y gas teniendo como resultado los siguientes: 50% de hidrógeno, 10% dióxido de carbono, 2% de dióxido de carbono, 30% de metano, 4% de nitrógeno y 4% de otros hidrocarburos. Esto es por el lado de gas es decir por cada kilogramo de hulla se obtienen 350g de gas y 650g de carbón.

### 2.5.7. Termólisis del agua.

En este método se utiliza agua como fuente principal primaria, en este caso este proceso consiste en calentar el agua para separar la molécula en hidrógeno y oxígeno, para llevar a cabo esta reacción se eleva la temperatura del agua hasta los 4300°C que es cuando se rompe el enlace hidrógeno y oxígeno para después separar el gas de hidrógeno y el oxígeno”

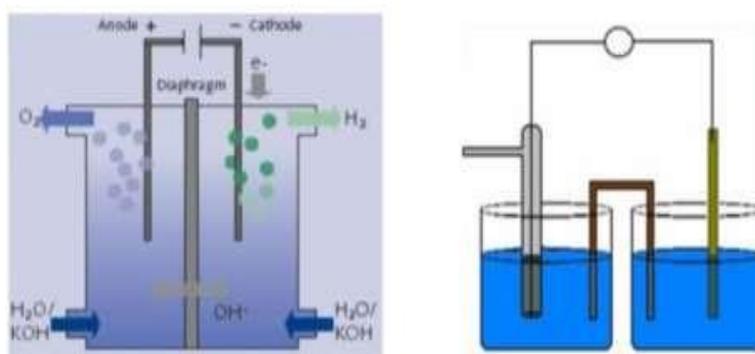
### 2.5.8. Electrólisis.

Juma & Martínez, (2015) mencionan:

Los procesos electrolíticos utilizan electricidad para romper la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno producido vía electrólisis se lleva a cabo mediante la energía eléctrica por lo que si la fuente de electricidad proviene de energías renovables como la eólica, solar, hidráulica, etc. se podría decir que las emisiones de gases invernadero son cero o cercanas a cero ya que la propia reacción solo produce hidrógeno y oxígeno.

El proceso se trata de fundir o disolver el electrolito en agua, se aplica una corriente eléctrica continua mediante un par de electrodos que están conectados a una fuente de corriente directa el electrodo negativo se conoce como cátodo, y el electrodo conectado al polo positivo se llama ánodo, cada electrodo mantiene atraídos a los iones de carga opuesta. Por lo que los iones de carga opuesta son atraídos al ánodo y al cátodo, es decir los iones positivos son atraídos al cátodo y los iones negativos al ánodo.

Como electrolito se usa comúnmente sosa cáustica (NaOH) o potasa cáustica (KOH) para tener una buena conductividad iónica.



**Figura 15** Funcionamiento de la electrólisis.

Fuente: (Torres E., 2014)

Una de las importantes maneras de producción de hidrógeno se logra a partir de la electrólisis, donde Torres E., (2014) lo define como: “El proceso de descomposición

de una sustancia por medio de la electricidad. La palabra electrólisis significa destrucción por la electricidad. Si se coloca un par de electrodos dentro de una solución de electrolito (compuesto ionizable) y se conecta una fuente de corriente continua entre ellos, los iones positivos de la solución se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia el positivo.

Al aplicar una diferencia de potencial eléctrica a dos electrodos dentro de una solución cáustica, los iones oxígeno se mueven hacia el electrodo negativo, se descargan y se depositan en el electrodo como átomos de oxígeno. Los iones hidrógeno se descargan a su vez en el electrodo positivo como átomos de hidrógeno

### 2.5.9. Producción de hidrógeno por electrólisis del vapor de agua.

Según Montes, Abánades & Martínez, (2010)

La electrólisis del agua es una tecnología conocida, en la que se lleva investigando muchos años. De forma teórica se puede afirmar que la electrólisis del agua se produce cuando se hace pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en un electrolito, así:



#### Ecuación 4 Reducción (cátodo).

Fuente: (Sánchez & Faus, 2007)



#### Ecuación 5 Oxidación (ánodo).

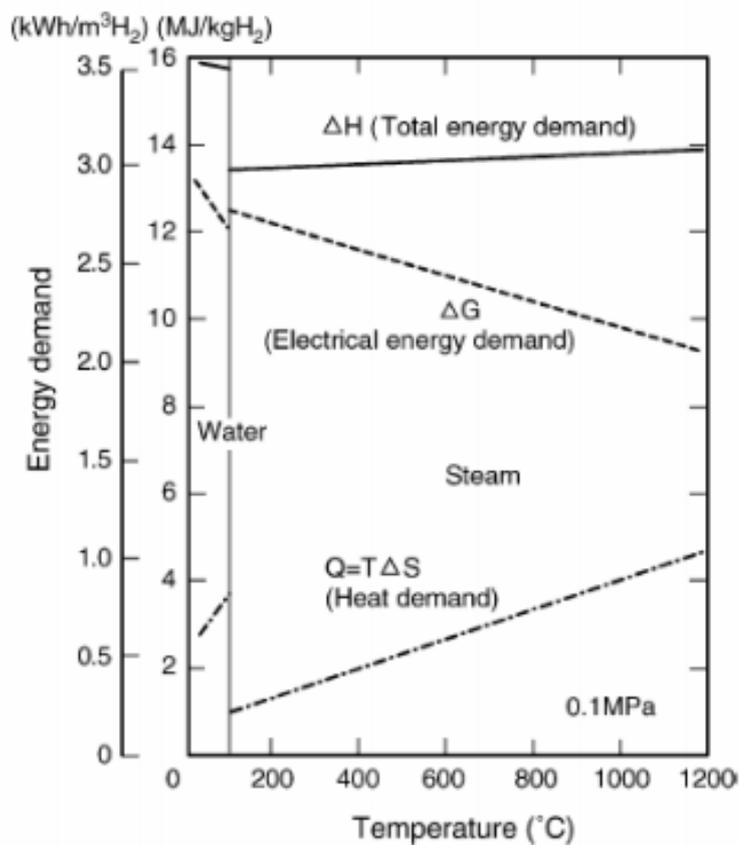
Fuente: (Sánchez & Faus, 2007)



#### Ecuación 6 |Obtención del hidrógeno por electrólisis del agua.

Fuente: (Sánchez & Faus, 2007)

El proceso de electrólisis puede ocurrir tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas, en cuyo caso, en lugar de agua, lo que se tiene es vapor, este método presenta la ventaja de requerir una entrada de energía eléctrica menor, lo cual se explica en la Figura16, que muestra la dependencia del proceso de electrólisis con la temperatura.



**Figura 16** Demanda de energía para la electrólisis del agua y del vapor.

Fuente: (Montes , Abádanes , & Martínez-Val, 2010)

La energía total que se requiere ( $\Delta H$ ) para la disociación, bien sea de agua o de vapor, es la suma de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) y de una cierta cantidad de energía calorífica ( $T \cdot \Delta S$ ). La demanda de energía eléctrica,  $\Delta G$ , disminuye conforme aumenta la temperatura. Es por ello que la electrólisis del vapor puede producir hidrógeno con una potencia eléctrica menor que la que se requiere para el caso del agua a temperaturas inferiores”

## 2.6. Economía del hidrógeno.

Según Aguirre O., (2013):

Jeremy Rifkin Presidente de la fundación de tendencias económicas y autor de la economía del hidrógeno predice que en el futuro habrá una red de energía basada en este ya que el petróleo está llegando a niveles altos en cuanto a costos de extracción además de la disminución de las reservas naturales.

La producción del hidrógeno centralizada, semi-centralizada o distribuida, juega un papel muy importante en la evolución a largo plazo del uso del hidrógeno como portador de energía, se cree que las nuevas tecnologías son tan revolucionarias que se tenga un nuevo fenómeno llamado la economía del hidrógeno. A comienzos de los años setenta surgió el concepto de economía del hidrógeno, en torno a la celebración de un seminario, celebrado en 1973 en Estados Unidos, para analizar cuáles serían los nuevos esquemas para la producción y distribución de energía en el año 2000.

Entre las propuestas discutidas estaba la producción centralizada de hidrógeno lo que hacía tecnológicamente posible y económicamente viable en función de los costos de producción. La primera conferencia internacional sobre este tema se celebró en marzo de 1974. Se trata de un escenario energético futuro en el que se pretende reemplazar a los combustibles fósiles, por lo que se requiere toda una infraestructura para contar con la capacidad para producirlo en las cantidades necesarias. El objetivo principal es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, además de contribuir a una mejor utilización de los recursos naturales locales.

Japón fue el primer país en establecer un plan nacional para la utilización del hidrógeno en celdas de combustible, como base de un nuevo sistema energético, y en enero de 2003 fue el lanzamiento de la “Hydrogen Fuel Initiative” con un presupuesto de 1200 millones de dólares por el presidente George Bush en USA. El objetivo de esta iniciativa es acelerar el desarrollo de tecnologías capaces de producir, transportar, almacenar y utilizar el hidrógeno paralelamente al desarrollo de celdas de combustible para vehículos, de manera que en el año 2030 el hidrógeno pueda ser competitivo en el sector del transporte.

## **2.7. Electrolito**

Un electrolito para Yanover, (2011)

Es una sustancia que puede someterse a la electrólisis (descomposición en disolución a través de la corriente eléctrica). Los electrolitos contienen iones libres que actúan como conductores eléctricos. Puede definirse al electrolito como el solvente que se disuelve en agua para generar una solución capaz de conducir la corriente

Gotelli, (2012) acota que:

Un electrolito fuerte es toda sustancia que, al disolverse en agua, provoca exclusivamente la formación de iones con una reacción de disolución prácticamente irreversible. Un electrolito débil es una sustancia que, al disolverse en agua, produce iones parciales, con reacciones de tipo reversible.

### **2.7.1. El agua como electrolito.**

Gotelli, (2012) dice:

El agua tiene un comportamiento electrolítico, ya que es capaz de disociarse en iones. Sin embargo, esta disociación es muy débil, ya que, en condiciones normales, en el equilibrio, de cada diez millones de moles de agua, sólo una mol se encuentra disociada.

## **2.8. Depósito de electrolito**

Duque, (2013) advierte que:

El depósito es utilizado para almacenar el electrolito y debe estar en condiciones de resistir una temperatura máxima de 90°C, el material del que están construido debe soportar la humedad, la corrosión, las vibraciones que normalmente están presentes en el movimiento de los vehículos. En el interior de estos depósitos se hallan divisiones, donde se separa el electrolito, el hidrógeno y el oxígeno, mismos que salen por sus respectivos conductos hacia el ambiente y el motor. El depósito mantiene el nivel de líquido lo más estable posible, además consta de un tapón que mantiene un cierre hermético y evita explosiones.

## **2.9. Método de introducción del hidrógeno al motor**

El hidrógeno es inyectado directamente en el conducto de admisión de la motocicleta de paseo serie Ranger, después de que se produce el proceso de electrólisis dentro del generador de hidrógeno, se envía este gas directamente al cilindro del motor permitiendo así que se realice una combustión más completa de la mezcla de aire combustible. Como el hidrógeno tiene una difusión rápida, la mezcla se enciende instantáneamente incrementando la potencia y disminuyendo las emisiones contaminantes.

## 2.10. Reactor de hidrógeno.

El reactor de  $H_2$  utiliza la electricidad de la batería del vehículo para crear hidrógeno a partir de la electrólisis del agua en un medio electrolítico con sosa cáustica. El hidrógeno se inyecta en el motor, en donde este se mezcla con el combustible existente. Se pretende además analizar la factibilidad que el motor funcione solo a base de hidrógeno.

Torres R., (2009) menciona:

En un motor típico, hasta el 80% de la energía del combustible es desperdiciada en forma de calor. El combustible mezclado con el Hidrógeno se quema más rápido y por completo, resultando en un mayor consumo por milla, ya que la energía se utiliza para alimentar el vehículo en lugar de crear un exceso de calor.



**Figura 17** Reactor de hidrógeno

**Fuente:** (Toande, 2012)

Toande, (2012) acota además:

El generador de hidrógeno es un recipiente herméticamente cerrado, que exteriormente consta de dos salidas correspondientes al oxígeno e hidrógeno, y una entrada para el electrolito; en el interior contiene placas de acero inoxidable quirúrgico sumergidas en un electrolito, y que al pasar la electricidad (generalmente de 12 volts) por dichas placas, produce hidrógeno que es conducido por mangueras, pasa por un recipiente de burbujas (bubbler) que le sirve de filtro y medida de seguridad, y luego llega al motor a través del sistema de admisión de aire, para ser consumido inmediatamente y junto con la gasolina. El generador produce lo que el motor requiere, siendo este un sistema de sobre demanda y no almacenaje.

La celda húmeda tipo Booster es un dispositivo que incrementa el rendimiento, reduce las emisiones contaminantes y aumenta el recorrido por galón de combustible, en carros y motocicletas (para cualquier vehículo con motor de combustión interna y que use combustible fósil, es decir, derivado del petróleo). Lo consigue empleando parte de la corriente proveniente de la batería del carro para disociar agua en sus componentes hidrógeno y oxígeno, el hidrógeno se mezcla con el aire que alimenta el motor y que ingresa al mismo por el múltiple de admisión”

El generador consta de 24 placas de acero inoxidable que se encuentran conectados entre sí en serie con una distancia de 0.2 cm, las dimensiones de las placas son de 18x14x0.1 cm<sup>3</sup>, trabaja con un voltaje de 24 voltios, una corriente de 12 A y el electrolito absorbe una corriente de 2 A.

### 2.11. Sosa cáustica.

Para la formación del electrolito se considera la sosa cáustica, donde este en combinación con el agua ayudará de gran manera al paso de los electrones y posterior descomposición del agua en moléculas de hidrógeno y oxígeno, como se verifica en su composición química molecular la sosa cáustica aporta con moles de hidrógeno beneficiando al reactor y al motor que se pretende utilizar como combustible.

Según Simes L., (2011):

El hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido sódico, también conocido como soda cáustica o sosa cáustica, es un hidróxido cáustico usado en la industria (principalmente como una base química) en la fabricación de papel, tejidos, y detergentes. Además, se utiliza en la industria petrolera en la elaboración de lodos de perforación base agua. A nivel doméstico, son reconocidas sus utilidades para desbloquear tuberías de desagües de cocinas y baños, entre otros.



**Figura 18** Sosa cáustica

Fuente: (Simes, 2011)

A temperatura ambiente, el hidróxido de sodio es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe la humedad del aire (higroscópico). Es una sustancia manufacturada, que cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor que puede ser suficiente como para encender materiales combustibles. El hidróxido de sodio es muy corrosivo. Generalmente se usa en forma sólida o como una solución de 50%.

El hidróxido de sodio se usa para fabricar jabones, crayón, papel, explosivos, pinturas y productos de petróleo. También se usa en el procesamiento de textiles de algodón, lavandería y blanqueado, revestimiento de óxidos, galvanoplastia y extracción electrolítica. Se encuentra comúnmente en limpiadores de desagües y hornos. También se usa como removedor de pintura y por los ebanistas para quitar pintura vieja de muebles de madera. Aunque modernamente es fabricado por electrólisis de una solución acuosa de cloruro sódico o salmuera, también es un subproducto que resulta del proceso que se utiliza para producir cloro”

<p><b>Nombre IUPAC</b> Hidróxido de sodio</p> <p><b>General</b></p> <p><b>Otros nombres</b> Hidróxido sódico, Soda cáustica, Sosa cáustica, Sosa lejía, Jabón de piedra, E-524, Hidrato de sodio.</p> <p><b>Fórmula molecular</b> NaOH</p>	<p><b>Riesgos</b></p> <p><b>Ingestión</b> Puede causar daños graves, permanentes al sistema gastrointestinal o fatales para la persona</p> <p><b>Inhalación</b> Irritación con pequeñas exposiciones, puede ser dañino o mortal en altas dosis.</p> <p><b>Piel</b> Peligroso. Los síntomas van desde irritaciones leves hasta úlceras graves.</p> <p><b>Ojos</b> Peligroso. Puede causar quemaduras, daños a la córnea o conjuntiva.</p> <p>Valores en el SI y en condiciones estándar (25 °C y 1 atm), salvo que se indique lo contrario.</p>
<p><b>Propiedades físicas</b></p> <p><b>Apariencia</b> Sólido. Blanco.</p> <p><b>Densidad</b> 2100 kg/m<sup>3</sup>; 2,1 g/cm<sup>3</sup></p> <p><b>Masa molar</b> 39,99713 g/mol</p> <p><b>Punto de fusión</b> 591 K (318 °C)</p> <p><b>Punto de ebullición</b> 1663 K (1390 °C)</p> <p><b>Propiedades químicas</b></p> <p><b>Solubilidad en agua</b> 111 g/100 mL (20 °C) / 13.89 g/100 mL (alcohol etílico a 20 °C)</p>	<p><b>Termoquímica</b></p> <p><math>\Delta H^0_{\text{gas}}</math> -197,76 kJ/mol</p> <p><math>\Delta H^0_{\text{liquido}}</math> -416,88 kJ/mol</p> <p><math>\Delta H^0_{\text{sólido}}</math> -425,93 kJ/mol</p> <p><math>S^0_{\text{gas, 1 bar}}</math> 228,47 J·mol<sup>-1</sup>·K</p> <p><b>Peligrosidad</b></p> <p>NFPA 704</p>

**Figura 19** Características de la sosa caustica

Fuente: (Simes, 2011)

## 2.12. Agua.

Según Simes L., (2011):

El agua es el principal e imprescindible componente del cuerpo humano. El ser humano no puede estar sin beberla más de cinco o seis días sin poner en peligro su vida. El cuerpo humano tiene un 75 % de agua al nacer y cerca del 60 % en la edad

adulta. Aproximadamente el 60 % de este agua se encuentra en el interior de las células (agua intracelular). El resto (agua extracelular) es la que circula en la sangre y baña los tejidos.

### **2.12.1. Propiedades fisicoquímicas.**

Sin duda alguna, el agua es uno de los elementos más importantes desde el punto de vista fisicoquímico, hasta tal punto que sus temperaturas de transformación de un estado a otro han sido tomadas como puntos fijos, a pesar de que su punto de congelación y ebullición sean anormales, debido a las asociaciones moleculares.

A temperatura ambiente, el agua pura es inodora, insípida e incolora, aunque adquiere una leve tonalidad azul en grandes volúmenes, debido a la refracción de la luz al atravesarla, ya que absorbe con mayor facilidad las longitudes de onda larga (rojo, amarillo, naranja) que las longitudes de onda corta (azul, violeta), desviando lentamente estas otras, provocando que en grandes cantidades de agua esas ondas cortas se hagan apreciables.

Su importancia reside en que casi la totalidad de los procesos químicos que suceden en la naturaleza, no solo en organismos vivos sino también en la superficie no organizada de la tierra, así como los que se llevan a cabo en la industria tienen lugar entre sustancias disueltas en agua”.

Henry Cavendish descubrió en 1781 que el agua es una sustancia compuesta y no un elemento. Estos resultados fueron anunciados por Antoine - Laurent de Lavoisier (1743 – 1794) en la Academia Francesa en 1783, dando a conocer que el agua estaba formada por oxígeno e hidrógeno. En 1804, el químico francés Joseph Louis Gay-Lussac (1778 – 1794) y el naturalista y geógrafo alemán Alexander von Humboldt (1769 – 1859) publicaron un documento científico que demostraba que el agua estaba formada por dos volúmenes de hidrógeno por cada volumen de oxígeno (H<sub>2</sub>O).

Entre las moléculas de agua se establecen enlaces por puentes de hidrógeno debido a la formación de dipolos electrostáticos que se originan al situarse un átomo de hidrógeno entre dos átomos más electronegativos, en este caso de oxígeno. El oxígeno, al ser más electronegativo que el hidrógeno, atrae más los electrones compartidos en los enlaces covalentes con el hidrógeno, cargándose negativamente, mientras los átomos de hidrógeno se cargan positivamente, estableciéndose así dipolos eléctricos.

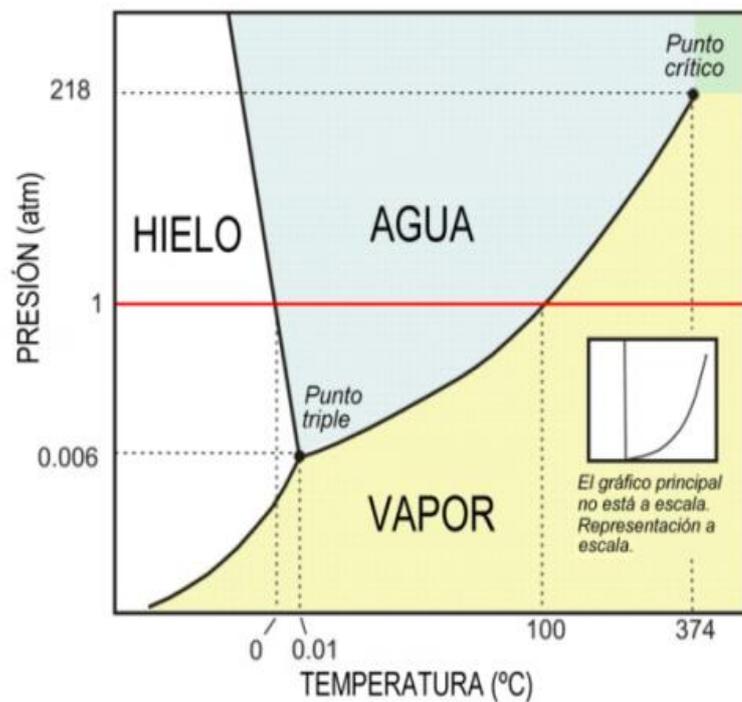
Los enlaces por puentes de hidrógeno son enlaces por fuerzas de Van Der Waals de gran magnitud, aunque son unas 20 veces más débiles que los enlaces covalentes. Los enlaces por puentes de hidrógeno entre las moléculas del agua pura son responsables de la dilatación del agua al solidificarse, es decir, su disminución de densidad cuando se congela”

### **2.12.2. Densidad.**

Según Reyes-García, C., & Andrade, J. L. (2007).

La densidad del agua líquida es altamente estable y varía poco con los cambios de temperatura y presión. A presión normal de 1 atmósfera, el agua líquida tiene una mínima densidad a 100 °C, cuyo valor aproximado es 0,958 Kg/l. Mientras baja la temperatura va aumentando la densidad de manera constante hasta llegar a los 3,8 °C donde alcanza una densidad de 1 Kg/l. Esta temperatura representa un punto de inflexión y es cuando alcanza su máxima densidad a presión normal. A partir de este punto, al bajar la temperatura, disminuye la densidad, aunque muy lentamente hasta que a los 0 °C alcanza 0,9999 Kg/l.

Cuando pasa al estado sólido ocurre una brusca disminución de la densidad, pasando a 0,917 Kg/l. Por tanto, la viscosidad, contrariamente a lo que pasa con otros líquidos, disminuye cuando aumenta la presión. Como consecuencia, el agua se expande al solidificarse. En la siguiente imagen se observa el diagrama de fases del agua, donde se puede diferenciar gráficamente lo aquí comentado”



**Figura 20 Diagrama de fases del agua**

Fuente: (Simes L., 2011)

### 2.12.3. Composición del agua.

Reyes-García, C., & Andrade, J. L. (2007) acota:

A fines del siglo XVII el agua era considerada un elemento, es decir, una sustancia formada por una sola clase de átomo. En 1781, el inglés Henry Cavendish demostró que el agua se formaba por la combustión del gas hidrógeno. Cavendish afirmaba: si el hidrógeno arde es porque reacciona con el oxígeno del aire formado en el agua. El agua no es una mezcla es un compuesto (sustancias formadas por distintas clases de átomos). En la actualidad a través de la electrólisis es posible demostrar que los elementos constituidos de agua son H y O.

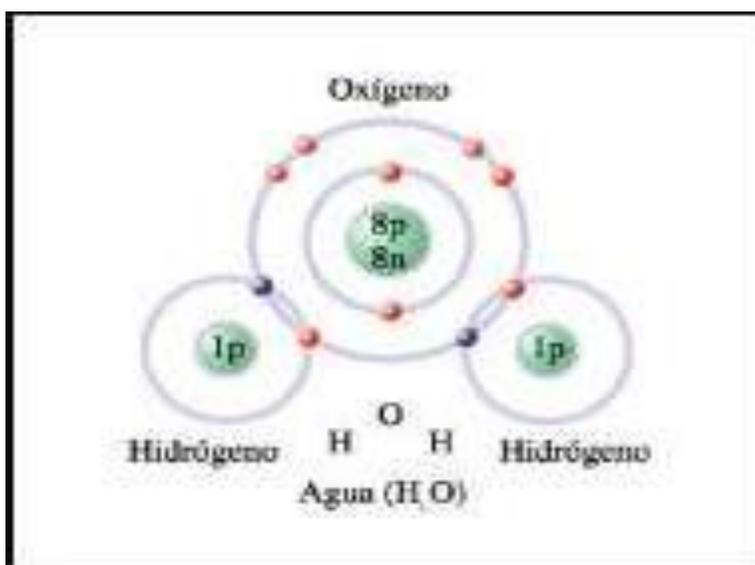
El procedimiento consiste en descomponer el agua, aplicando corriente eléctrica para obtener hidrógeno y oxígeno gaseoso.



**Figura 21** Diagrama básico de la electrólisis del agua

Fuente:( Burbano, 2003)

La estructura de la molécula del agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno los cuales se unen a través de un covalente polar, dando como resultado la molécula de geometría angular, es decir, los átomos de hidrógeno están separados entre sí aproximadamente 0.96 Angstroms (más o menos un nanómetro – una milmillonésima de metro) y el ángulo que forma sus líneas de enlace es de unos 104,45 grados.

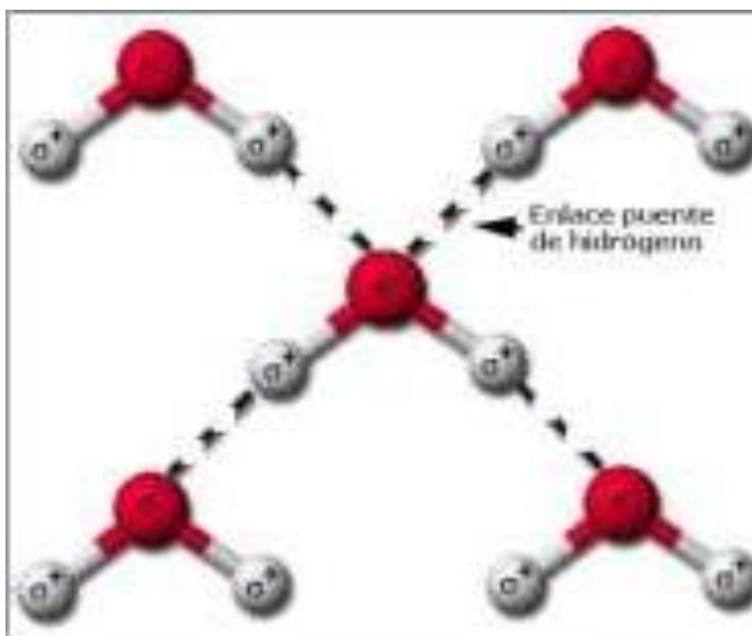


**Figura 22** Diagrama de la molécula del agua

Fuente: (Burbano, 2003)

Su fórmula química es  $H_2O$ , que nos indica que la proporción de hidrógeno y oxígeno en la molécula es 2: 1. Si compramos los átomos el Oxígeno tiene más electrones o densidad electrónica que el átomo de hidrógeno. Esto determina que la molécula de agua sea polar, es decir sobre el átomo de oxígeno hay una densidad electrónica mayor que genera una carga parcial negativa. El enlace químico que se forma entre el O y H participa los electrones del nivel más externo de sus átomos, son atraídos fuertemente hacia el oxígeno debido a su mayor electronegatividad (tendencia de un átomo para atraer electrones), es decir el oxígeno adquiere una carga potencial negativa y el hidrógeno una carga parcial positiva. Estos enlaces dan lugar a un tipo de molécula polar, esto significa que la molécula de agua tiene carga positiva hacia el extremo donde se encuentran los átomos de hidrógeno y carga negativa hacia el extremo contrario donde se ubica el átomo de oxígeno.

Del mismo modo las uniones intermoleculares permiten mantener unidas las moléculas de un compuesto. Dadas las características de polaridad de la molécula del agua, la unión se establece por medio de una fuerza de atracción intermolecular llamada enlace por puente de hidrógeno.



**Figura 23** Diagrama de enlaces del agua por puente de hidrógeno

Fuente:( Burbano, 2003)

Dicho de otro modo, el extremo positivo de una molécula de agua resulta fuertemente atraído por el extremo negativo de otra molécula de agua cercana de forma que con la molécula del entorno próximo se forman redes de moléculas unidas entre sí a través de un enlace especial llamado puente de hidrógeno”

#### 2.12.4. El agua disuelve algunas cosas.

Burbano, (2003) denomina:

La solubilidad depende de las propiedades de un solvente que le permiten interactuar con un soluto de manera más fuerte que como lo hacen las partículas del solvente unas con otras, el agua es el líquido que más sustancias disuelve, por eso decimos que es el “disolvente universal”, en particular, el carácter polar del agua la hace un excelente solvente para los solutos polares iónicos, que se denominan solutos hidrofílicos (del griego *hydor*, agua y *philos*, amante).

Por otra parte, los compuestos no polares son insolubles en el agua (el agua y el aceite no se mezclan. Los compuestos apolares, son solubles en solvente no polares como el CCL4 (tetracloruro de carbono) o el hexano y puede resumirse en: “lo semejante disuelve lo semejante”. La constante dieléctrica del agua explica parcialmente porque el agua es “El solvente Universal”.

Las sales, como el NaCl (cloruro de sodio) se mantienen unidas por fuerzas iónicas. Los iones en una molécula, compuesto o solución interactúan de acuerdo a la Ley de Coulomb:

$$F = K \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

#### Ecuación 7 Fórmula de la primera ley de Coulomb.

Fuente: (Burbano, 2003)

- **F** es la fuerza entre las dos cargas eléctricas ( $q_1$  y  $q_2$ ), que están separadas por una distancia **r**.
- **D** es la constante dieléctrica del medio entre las cargas
- **k** es una constante de proporcionalidad ( $8.99 \cdot 10 \text{ J} \cdot \text{m} \cdot \text{C}^{-2}$ )

**Tabla 7****Valores de constante dieléctrica y momento dipolar para algunos líquidos.**

Solvente	Constante dieléctrica (D)	Momento dipolar (debye)
Formamida	110.0	3.37
Agua	78.5	1.85
Dimetil sulfóxido	48.9	3.96
Metanol	32.6	1.66
Etanol	24.3	1.68
Acetona	20.7	2.72
Amoniac	16.9	1.47
Cloroformo	4.8	1.15
Eter dietílico	4.3	1.15
Benceno	2.3	0.00
CCL <sub>4</sub>	2.2	0.00
Hexano	1.9	0.00

**Fuente:** (Burbano, 2003)

### 2.13. Combustión del hidrógeno en motores alternativos.

Hurtado J. & Soria B. (2007), menciona:

Seguidamente se resume lo más significativo de DOYL98, basado en los trabajos del Musashi Institute of Technology (Japón) y que está focalizado en motores alternativos, no abordando por tanto las peculiaridades de las turbinas de gas, el otro gran campo de la combustión directa.

El hidrógeno posee tres características que determinan su comportamiento en un motor alternativo:

- Los límites de inflamabilidad son tan amplios que casi cualquier proporción de aire/combustible produce una buena combustión.
- La elevada temperatura de auto-ignición impide el empleo de motores diésel, debiendo recurrir a los motores de encendido provocado.
- La elevada velocidad de la llama puede ser un inconveniente en los sistemas con baja presión de inyección debido a los problemas de detonación; por el contrario puede ser una ventaja en los sistemas de elevada presión de inyección.

En la combustión de hidrógeno en motores alternativos existen dos aproximaciones: La formación externa de la mezcla y la formación interna.

En la formación externa de la mezcla, ésta se realiza fuera del cilindro, realizándose

por tanto a presión similar al ambiente. Debido a esta baja presión se produce el efecto antes mencionado del desplazamiento del aire por el gran volumen ocupado por el hidrógeno, lo que provoca pérdidas de potencia respecto a la operación con gasolina de entre el 15 y el 40%. Los procesos son similares a cuando se emplea gasolina, siendo la relación de compresión del orden de 10. En cuanto a la respuesta, cuando se opera a carga parcial el comportamiento es suave, con un rendimiento elevado y sin excesiva presencia de NO<sub>x</sub> en los humos. Por el contrario, a plena carga ocurren problemas de detonación y se incrementa el contenido de NO<sub>x</sub> en los humos. La potencia cae respecto al motor de gasolina debido no sólo al desplazamiento del aire sino al empeoramiento de la combustión. Para arreglar estos problemas se recurre bien al empleo de recirculación de aire por el cilindro para reducir su temperatura o bien empleando hidrógeno comprimido de baja temperatura o incluso licuado para operar también a bajas temperaturas y retrasar así los problemas de detonación.

La formación interna de la mezcla aparentemente puede resolver los problemas del sistema de formación externa. En la formación interna la mezcla de hidrógeno y aire se realiza en el cilindro con las válvulas cerradas, a aproximadamente 100 bar. Esto presenta también serios problemas, tales como la necesidad de emplear hidrógeno licuado (si fuese comprimido por debajo de 100 bar no sería aprovechable), lo que obliga a hacer trabajar a los inyectores en condiciones criogénicas.

Esto provoca que no existan prototipos que implanten esta tecnología. Como alternativa se plantea la formación interna de la mezcla a presión intermedia, es decir, durante la carrera de compresión, pero antes de que se alcancen en el cilindro 10 bar. En esas condiciones los inyectores no están tan castigados, se puede recurrir a elevadas relaciones de compresión y con sobrealimentación la potencia se puede maximizar, pudiendo llegarse a obtener un 120% de la potencia lograda con gasolina.

Desafortunadamente este esquema de moderada presión es más sensible que el de alta a los problemas de detonación, lo que llega a anular el incremento de potencia anterior.

#### **2.14. Combustión de hidrógeno en turbinas de gas.**

Además, Hurtado J. & Soria B. (2007), acota:

Si bien la elevada temperatura de combustión del hidrógeno puede provocar problemas de emisiones de NO<sub>x</sub>, no es menos cierto que su amplio rango de inflamabilidad contribuye a estabilizar la llama, permitiendo el uso de mezclas ultra pobres premezcladas. En el Sandia National Laboratory de California sostienen que las mezclas de hidrógeno con hidrocarburos mejoran la estabilidad de la combustión durante la combustión con mezclas pobres, permitiendo reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>.

El empleo de estas mezclas de hidrógeno con hidrocarburos y otros gases de bajo poder calorífico surge de manera natural en las centrales de gasificación de carbón integrada en ciclo combinado (GICC). El gas de síntesis producido a partir de la gasificación del carbón básicamente es una mezcla de monóxido de carbono,

hidrógeno y otros, donde la cantidad de hidrógeno no excede del 30% en volumen. Así, por ejemplo, en la central de ELCOGAS (Puerto llano, España) se logran unas emisiones mucho más bajas que con otras tecnologías fósiles, tal como ilustra la siguiente Tabla.

**Tabla 8**

**Comparación de las emisiones de un GICC (ELCOGAS en Puerto llano) en modo gas de carbón comparado con otras tecnologías fósiles.**

	SO <sub>2</sub> [g/kWh]	NO <sub>x</sub> [g/kWh]	Partículas[g/ kWh]
Carbón polvo (sin tratamiento de gases)	25.3	4.5	42.9
Carbón polvo (con tratamiento de gases)	21.5	21.3	0.34
Lecho fluidizado atmosférico	1.4	0.8	0.1
GICC (ELCOGAS)	0.066	0.397	0.02

**Fuente:** (Hurtado & Soria, 2007)

Otro aspecto importante de las centrales GICC, como ya se comentó en los procedimientos de obtención de hidrógeno, es que si se les dota de captura de CO<sub>2</sub> constituyen una vía limpia de producción de hidrógeno, que puede ser alternada con la producción eléctrica.

### 2.15. Proyectos significativos

Para Hurtado J. & Soria B. (2007):

En las turbinas de gas ya se ha comentado que los proyectos significativos a nivel de demostración son los de plantas GICC, teniendo en España el ejemplo de ELCOGAS en Puerto llano. A nivel de investigación más básica en los efectos del hidrógeno en las mezclas se pueden consultar los trabajos del Combustión Research Facility<sup>31</sup> de los Sandia Nacional Laboratories.

En cuanto a los motores alternativos, entre los más importantes se pueden citar:

#### **Europa:**

- BMW en 1990 empleó hidrógeno licuado en un motor de gasolina de 6 cilindros montado sobre un coche. Se obtuvo un 30% menos de potencia, apareciendo emisiones de NO<sub>x</sub>.
- Daimler Benz en 1995 empleó hidrógeno comprimido en un motor diésel modificado para un autobús, logrando una curva de potencia similar al del motor diésel aunque con un par menor a bajas revoluciones.
- MAN en 1996 empleó hidrógeno licuado en un motor de gas natural para un autobús.
- VCST-Hydrogen Systems, de Bélgica, empleó en 1993 hidrógeno licuado en un motor diésel modificado.

- ENEA, de Italia, empleó hidrógeno comprimido en un motor de gasolina para un microbús.

#### **Estados Unidos:**

- Hydrogen Consultants empleó hidrógeno comprimido en un motor de gasolina para una furgoneta en 1995, obteniendo una pérdida de potencia respecto al motor original.

#### **Japón:**

- Musashi Inst. of Technology de Tokio empleó hidrógeno licuado en un motor diésel modificado para un monoplaza en 1990 y posteriormente en 1994.

Los coches a hidrógeno son una de las grandes alternativas para contrarrestar el elevado precio de los combustibles fósiles y el calentamiento global.



**Figura 24 Motor de hidrógeno**

**Fuente:** (Hurtado & Soria, 2007)

Actualmente, en el mercado existen muy pocos vehículos propulsados a través de un motor de hidrógeno. Pero, aunque esto sea así, los fabricantes de vehículos siguen estudiando su viabilidad, por lo que cada vez hay más prototipos que montan este tipo de motores, pensando que lleguen a la producción en un corto espacio de tiempo”

Colectivo D. (2012) menciona, además:

El hidrógeno, un combustible abundante y barato, está presente en las tendencias futuras para los vehículos, porque pese a sus actuales y grandes inconvenientes, especialmente a lo que almacenamiento se refiere, hay fabricantes que siguen investigando para obtener motores propulsados por hidrógeno. No sólo fabricantes de automóviles, sino que también países como Noruega cuentan con esfuerzos en infraestructura e investigación de nuevos vehículos propulsados por hidrógeno. En un primer intento Mazda cuenta ya con la versión RX8, un automóvil equipado con un motor que trabaja con hidrógeno y gasolina

### 2.15.1. Funcionamiento de los motores de hidrógeno.

El proceso es sencillo, en un motor de hidrógeno se combinan tanto el hidrógeno como el aire que son constantemente introducidos en el motor.



**Figura 25** Vehículo con motor de hidrógeno

Fuente: (Hurtado & Soria, 2007)

El hidrógeno es una fuente de energía limpia, sostenible y por tanto respetuosa con el medio ambiente, puesto que las emisiones que producen es agua, en vez de  $\text{CO}_2$ , que son gases contaminantes.

### 2.16. Almacenamiento y transporte del hidrógeno.

Castells E. (2012), menciona:

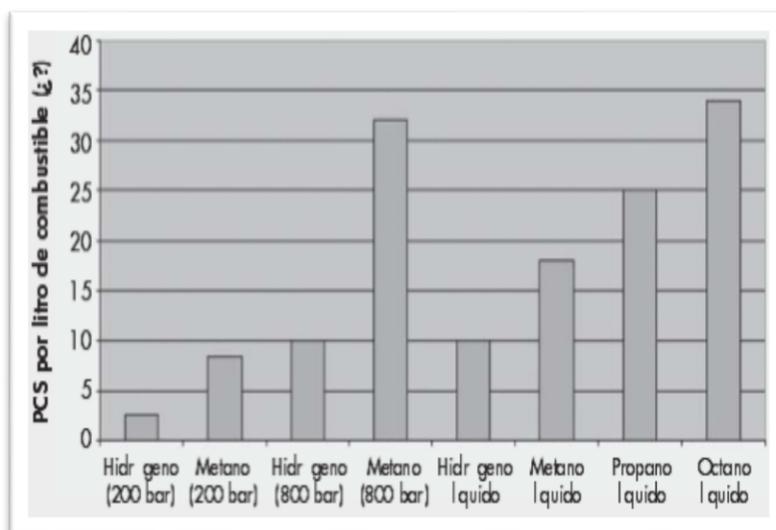
Para el almacenamiento y transporte de hidrógeno, teniendo en cuenta la rentabilidad y, por tanto, las perspectivas de futuro de su uso como combustible, es muy importante considerar su poder calorífico volumétrico. El hidrógeno debe ser comprimido o licuefactado para su almacenamiento y transporte, y posterior comercio.

A cualquier presión, el hidrógeno contiene menos energía por unidad de volumen que el metano (entendido como gas natural), metanol, propano u octano (entendido como gasolina), tal como se muestra en la figura 26.

A 800 bar el hidrógeno alcanza la misma densidad de energía que el hidrógeno líquido, pero el metano alcanza una densidad energética superior a la del hidrógeno en un factor de 3.2. El metanol la sobrepasa en un factor de 1.7 a presión atmosférica.

El hidrógeno a 800 bar o licuefactado, que ser a lo más efectivo, solamente puede ser almacenado en tanques a presión de alta tecnología y tanques criogénicos, lo que supone un alto coste, mientras que los líquidos a presión atmosférica son fácilmente transportables. Esto hace del metanol un vehículo energético ideal. La molécula de hidrógeno es tan pequeña que se difunde y escapa muy fácilmente. Esto se traduce en que los tanques para contener hidrógeno son muy especiales y caros.

Debido a la importancia de este aspecto, el proyecto europeo STORHY (Sistema de almacenamiento de hidrógeno para la aplicación en automoción), que dio comienzo en marzo de 2004, pretende desarrollar un sistema fiable de almacenamiento de hidrógeno para vehículos. Este programa explorará las posibilidades del almacenamiento a alta presión criogénico y en forma de hidruros metálicos.



**Figura 26 Densidad de energía para diversos combustibles.**

**Fuente:** (Castell, 2012)

Botas, Calles, Dufour, & San Miguel (2005) acotan además:

En la actualidad existen distintas formas de almacenar hidrógeno, tanto para aplicaciones estacionarias como para el sector del transporte (en forma gaseosa, líquida, combinado químicamente o absorbido en sólidos porosos), dependiendo su elección de diferentes factores como el proceso final en el que se vaya a emplear, la densidad energética requerida, la cantidad a almacenar y la duración del almacenamiento, la existencia de otras posibles formas de energía disponibles, los costes y necesidades de mantenimiento de la instalación, y los costes de operación

## 2.17. Transporte y distribución

Botas, Calles, Dufour, & San Miguel (2005) mencionan:

Las opciones para el transporte y distribución de hidrógeno como combustible están condicionadas por sus características físico-químicas, que dificultan el uso de las infraestructuras ya establecidas para el transporte de combustible convencionales.

Tanto si se utilizaran gaseoductos, el transporte por carretera sería también de gran relevancia y, para que el hidrógeno sea viable como combustible, el coste de transporte y distribución debería llegar a ser competitivo con el de los combustibles de gran difusión no solamente en términos económicos sino también de seguridad.

A partir de los datos de las tres principales distribuidoras gasistas alemanas, es inviable la distribución de hidrógeno mediante camiones para abastecer las gasolineras por razones económicas y de seguridad. Estiman que una estación de servicio necesitaría la llegada de 21 camiones de 40 toneladas para vender 25 toneladas de combustible diariamente, en comparación con un solo camión de gasolina” (p. 1049).

## 2.18. Levantamiento de fórmulas

### 2.18.1. Mezcla de gases.

Romero J. & Mendoza A. (2014), mencionan:

Una mezcla de dos o más gases de una composición química fija se llama “mezcla de gases no reactiva”. Existen dos maneras de especificar la composición de una mezcla de gases, dependiendo del análisis que se utilice para medir las proporciones, y son las siguientes:

**Fracción Molar ( $\gamma_i$ ):** Se define como la relación entre el número de moles del componente entre el número de moles de la mezcla; en este caso nos estamos basando en un análisis molar, pues como ya se mencionó lo que se está midiendo es el número

de moles. La ecuación correspondiente sería:

$$\gamma_i = \frac{N_i}{N_m} \rightarrow \sum_{i=1}^n \gamma_i = 1$$

#### **Ecuación 8 Suma del número de moles**

**Fuente:** (Romero & Pitre, 2014)

Donde:

$$N_m = N_1 + N_2 \dots + N_m = \sum_{i=1}^n N_i$$

#### **Ecuación 9 Suma del número de moles**

**Fuente:** (Romero & Pitre, 2014)

Esta ecuación indica que al igual que la masa de varios componentes se pueden sumar, el número de moles también para obtener el número de moles totales de la mezcla. Además, es obvio, recordar que, al sumar las fracciones molares, el resultado debe igualarse a la unidad.

**Fracción volumétrica (X<sub>i</sub>):** Se define como la relación entre el flujo volumétrico del componente entre los flujos volumétricos totales de la mezcla; en este caso nos estamos basando en un análisis gravimétrico, donde la variable a medir en este caso es el flujo volumétrico. La ecuación correspondiente sería:

$$X_i = \frac{V_i}{V_m} \rightarrow \sum_{i=1}^n X_i = 1$$

#### **Ecuación 10 Fracción volumétrica**

**Fuente:** (Romero & Pitre, 2014)

Donde:

$$V_m = V_1 + V_2 + \dots + V_m = \sum_{i=1}^n V_i$$

**Ecuación 11 Suma de Fracciones volumétricas**

Fuente: (Romero & Pitre, 2014)

**2.18.2. Combustibles y combustion**

Según Cengel A., & Boles M., (2009):

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. Los combustibles más conocidos son los hidrocarburos, que contienen moléculas de carbón e hidrógeno y se expresan con la fórmula  $C_xH_y$ . Los combustibles existen en todas las fases, algunos son el Carbón. La gasolina y el gas natural.

Para la reacción química de la combustión es necesario un combustible y un carburante, el combustible puede ser un derivado del petróleo y el carburante el aire, porque contiene oxígeno que es el que reacciona con el combustible y se lo encuentra en la atmósfera.

El aire seco en base molar es una composición de gases tales como el nitrógeno en un 78,1 %, oxígeno en un 20% y 0,9 % de argón y pequeñas cantidades de otros gases como el hidrógeno, helio, dióxido de carbono y neón. Para el análisis del proceso de combustión al aire seco se lo considera como 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno. En una base molar al aire se lo puede considerar como una composición de 4,76 Kmol, por cada Kmol de oxígeno del aire viene acompañada de 3,76 Kmoles de nitrógeno, así:



**Ecuación 12 Base molar del aire**

Fuente: (Cengel & Boles, 2009)

En una combustión ideal todo el carbón y el hidrógeno reaccionan con el oxígeno, mientras que el nitrógeno se comporta como gas inerte y no reacciona con otros elementos químicos, sin embargo, en un análisis real dentro de una cámara, el nitrógeno reacciona con el oxígeno a temperaturas altas formando pequeñas cantidades de óxidos nítricos, los cuales son peligrosos para la salud y el medio ambiente.

En el proceso de combustión los compuestos que existen antes de la reacción recibe el nombre de reactivos, y los componentes que se forman luego del proceso se llaman productos. En la combustión es necesario considerar que el aire contiene vapor de agua (humedad) debido a que esta afecta al proceso de combustión.

No es suficiente poner un combustible en contacto con el oxígeno para que inicie la combustión, ya que la temperatura de la mezcla debe estar por arriba de su temperatura de ignición para que produzca la combustión. Las temperaturas de ignición de los combustibles aproximadas con el aire atmosférico son: para la gasolina 260 °C, para el carbono 400 °C, para el hidrógeno 580°C, para el monóxido de carbono 610 °C y para el metano 630 °C y para que ocurra la combustión estos deben estar en una proporción adecuada.

La relación aire-combustible (AC), es una relación utilizada para el análisis de combustión, se expresa en masas para cuantificar la cantidad en Kg de aire necesario para quemar un Kg de combustible, la cual es calculada por:

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{m_{aire}^*}{m_{combustible}^*}$$

$$1.Kmol.O_2 + 3.76.Kmol.N_2 = 4.76.Kmol_{aire}$$

### Ecuación 13 Relación aire - combustible

Fuente: (Cengel & Boles, 2009)

### 2.18.3. Relación de equivalencia.

La relación de equivalencia,  $\Phi$  se usa comúnmente para indicar cuantitativamente si la mezcla de combustible-aire es rica, pobre o estequiométrica. La razón de equivalencia está definida como:

$$\Phi = \frac{AC_{\text{estequiométrico}}}{AC_{\text{real}}}$$

#### Ecuación 14 Relación de equivalencia

Fuente: (Cengel & Boles, 2009)

De esta definición, se observa que para las mezclas ricas en combustible  $\Phi < 1$ , y para mezclas pobres de combustible  $\Phi > 1$ . Para una mezcla estequiométrica  $\Phi = 1$ . En muchas aplicaciones de combustión, la razón de equivalencia es el factor más importante para la determinación del rendimiento del sistema.

### 2.18.4. Flujo de aire y combustible que ingresa al motor.

El flujo másico de aire que ingresa al motor puede calcularse mediante la expresión:

$$m_{\text{aire}}^* = \frac{\rho_{\text{aire}} N V_{\text{cd}} n_v}{i}$$

#### Ecuación 15 Flujo másico de aire

Fuente: (Cengel & Boles, 2009)

Donde:

$m_{\text{aire}}$ : Flujo másico de aire que ingresa al motor.

$\rho_{\text{aire}}$ : Densidad de aire.

$N$ : Régimen de giro del motor.

$V_{\text{cd}}$ : Cilindrada del motor.

La cilindrada del motor se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$V_{cd} = \frac{\pi}{4} B^2 l$$

### Ecuación 16 Cilindrada de un motor

Fuente: (Cengel & Boles, 2009)

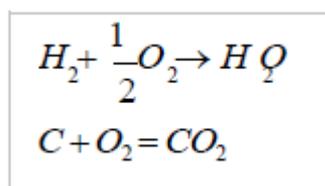
Donde:

B: Calibre del pistón.

l: Carrera del pistón.

#### 2.18.5. Procesos de combustión.

Para el análisis teórico (ideal) de un proceso de combustión se debe suponer que el combustible que ingresa a la cámara de combustión se quema completamente, es decir, que todo el carbón se transforma en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y todo el hidrógeno se transforma en agua (H<sub>2</sub>O). La cantidad exacta de aire que debe estar presente en un proceso de combustión recibe el nombre de aire estequiométrico o teórico. En un proceso de combustión con aire menor al 100% se considera como una combustión incompleta. La combustión estequiométrica es un proceso ideal, donde un combustible reacciona completamente con aire teórico. Las ecuaciones estequiométricas teóricas del carbono y del hidrógeno son:



### Ecuación 17 Ecuaciones teóricas de combustión

Fuente: (Cengel & Boles, 2009)

En los procesos de combustión reales se emplea más aire que la cantidad estequiométrica con el propósito de garantizar una combustión completa o para reducir la temperatura de la cámara de combustión. El exceso de aire en un proceso de combustión se expresa como aire teórico porcentual, por ejemplo, un 25% de exceso de aire corresponde a un aire teórico de 125%.

### 2.18.6. Fórmulas básicas complementarias a utilizar en el desarrollo del diseño.

Las siguientes fórmulas son necesarias para los cálculos de áreas y volúmenes.

$A = b * h$
b = base
h = altura

#### Ecuación 18 Área del rectángulo

Fuente: (Sullivan, 2006)

$A = \pi * r^2$
$\pi = \text{pi (constante 3.1416)}$
r = radio

#### Ecuación 19 Área del círculo

Fuente: (Sullivan, 2006)

$V = a * b * h$
a = longitud
b = latitud h
= altura

#### Ecuación 20 Volumen del ortoedro

Fuente: (Sullivan, 2006)

$V = \pi * r^2 * h$
a = longitud
b = latitud h
= altura

#### Ecuación 21 Volumen del cilindro

Fuente: (Sullivan, 2006)

### 2.18.7. Flujo de gas hidrógeno.

En el Flujo de hidrógeno se considera como el paso del gas hidrógeno – oxígeno obtenido de la descomposición del agua gracias al paso de corriente en un medio electrolítico.

Se calculó cuánto gas hidrógeno – oxígeno se genera en 1 minuto (60s), con una intensidad de 12 A y en condiciones de presión y temperatura normales, es decir a 1 atm y 25°C (298°K) respectivamente.

$$m = \frac{E * I * t}{F}$$

m = masa (g)

E = Peso equivalente (g/mol)

I = Intensidad de corriente (A)

t = Tiempo

F = Constante de Faraday (96500 c/mol)

### Ecuación 22 Ecuación 2.23 Ley de Faraday

Fuente: (Jaramillo , 2004)

$$E = \frac{Pa}{V}$$

Pa = Peso atómico (g)

V = Valencia (mol)

### Ecuación 23 Peso equivalente

Fuente: (Gayoso, 1991)

$$I = \frac{Q}{t}$$

I = Intensidad de corriente (A)

Q = Carga eléctrica (coulomb)

t = Tiempo (s)

#### **Ecuación 24 Intensidad de corriente**

**Fuente:** (Fowler, 1994)

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

P = Presión (atm)

V = Volumen (litros)

n = Número de moles (mol)

R = Constante universal de los gases  $\left( 0,082 \frac{\text{atm} * \text{l}}{\text{mol} * ^\circ \text{K}} \right)$

T = Temperatura ( $^\circ$  K)

#### **Ecuación 25 Ley de los gases ideales**

**Fuente:**(Fowler, 1994)

#### **2.18.8. Torque (T).**

Cuando se habla de par motor o de torque es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia. La potencia desarrollada por el par motor es proporcional a la velocidad angular del eje de transmisión.

Formula:

$$T = \frac{HP * 5252}{RPM}$$

T = Torque

HP = Caballos de fuerza

RPM = Revoluciones por minuto

### **Ecuación 26 Torque**

**Fuente:**(Fowler, 1994)

#### **2.18.9. Potencia al freno (P).**

Es la que mide la potencia del motor, la valoración de sus caballos de potencia y su capacidad del motor para producir trabajo en las ruedas conductoras o en el eje de salida, a esta capacidad se la denomina potencia.

Formula:

$$P = Tq \frac{2\pi N}{60}$$

P = Caballos de fuerza Tq = Torque

W = Velocidad angular

### **Ecuación 27 Potencia**

**Fuente:**(Fowler, 1994)

## CAPÍTULO III

### REACTOR DE HIDRÓGENO PARA UTILIZARLO COMO COMBUSTIBLE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Para el diseño del reactor se tomó en consideración y de gran importancia que el hidrógeno es altamente inflamable a una chispa, por esta razón se buscó elementos herméticos y mangueras propiamente para gas que ayudaran a eliminar fugas, sabiendo que el H<sub>2</sub> no tiene color ni olor, siendo indetectable a los sentidos humanos.

#### 3.1. Levantamiento de requerimientos

Con los requerimientos planteados se procedió a diseñar y construir el sistema de generación de gas hidrógeno para la motocicleta de paseo serie Ranger, el cual consta de componentes mecánicos y eléctricos que luego de ser ensamblados se procedió a instalar y adaptar directamente en el sistema de admisión de la motocicleta. El reactor de gas hidrógeno diseñado para el motor posee las siguientes características:

**Tabla 9**

#### Ficha técnica del reactor de hidrógeno.

ESPECIFICACIONES DEL REACTOR DE HIDRÓGENO		
Características	Reactor I	Reactor II
Número de placas	17	17
Número de placas negativas	5	5
Número de placas positivas	4	4
Número de placas neutras	8	8
Número de separadores	64	64
Cámaras generadoras de hidrógeno	1	1
Toma de abastecimiento del electrolito	1	1
Toma de salida de gas al burbujeador	1	1
Voltaje	12 V CC	12V CC
Consumo eléctrico	6 A	6 A
Capacidad de electrolito	1500 <sup>3</sup>	1501 <sup>3</sup>

### 3.1.1. Datos de los elementos del reactor de hidrógeno

Para realizar los cálculos se muestra a continuación los siguientes datos de las dimensiones:

**Tabla 10**

#### Dimensiones de los componentes

DIMENSIÓN DE LA PLACA	
Base	6 cm
Altura	14 cm
Espesor	0.1 cm
DIMENSIÓN DE LOS SEPARADORES	
Diámetro mayor	2.5 cm
Diámetro menor	1.2 cm
Espesor	0.2 cm
Número de separadores por placa de un lado	4

A continuación, se calculará el área y el volumen de operación de los componentes del reactor.

Según la fórmula 18 el área mayor de las placas del reactor se tiene:

$$A = b \times h$$

$$A_{\text{cara mayor}} = 6 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$$

$$A_{\text{cara mayor}} = 84 \text{ cm}^2$$

Las placas tienen dos caras principales, entonces el área de contacto que tendrá el electrolito con las placas es de:

$$A_{\text{total de contacto mayor}} = 2 \times 84 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{total de contacto mayor}} = 168 \text{ cm}^2$$

También se calculará el área menor de la placa.

$$A_{\text{cara menor}} = 6 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm}$$

$$A_{\text{cara menor}} = 0.6 \text{ cm}^2$$

De la misma manera, estas caras menores de la placa tienen un contacto con el electrolito en un área total de:

$$A_{\text{total de contacto menor}} = 4 \times 0.6 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{total de contacto menor}} = 2.4 \text{ cm}^2$$

Tomando en consideración que a más área de contacto de los separadores, menor el área de contacto de las placas con el electrolito y posterior menor el hidrógeno obtenido.

$$A = (\pi \times r^2)$$

$$A_{\text{mayor}} = 3.1416 \times (1.25 \text{ cm})^2$$

$$A = 4.9 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{menor}} = 3.1416 \times (0.6 \text{ cm})^2$$

$$A = 1.13 \text{ cm}^2$$

A este resultado se dividirá para 8, porque cada separador cilíndrico fue cortado en ese número de pedazos. Entonces el área de contacto de los separadores con las placas fue de:

$$A_{\text{contacto}} = (A_{\text{mayor}} - A_{\text{menor}}) / 8$$

$$A_{\text{contacto}} = (4.9 - 1.13) / 8 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{contacto}} = 0.47125 \text{ cm}^2$$

Se calculará el área total de contacto de los separadores con cada placa: Cabe destacar que la placa tiene dos caras principales de contacto con los separadores, por la misma razón se utiliza 4 separadores en una cara y 4 separadores en la otra, así que se llega a la conclusión que el área de contacto de los separadores con las placas total es de:

$$A_{\text{contacto}} = 0.47125 * 8 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{contacto}} = 3.77 \text{ cm}^2$$

Ahora bien se calculará el área total de contacto de las placas con el electrolito:

$A_{\text{contacto electrolito-placas}} = A_{\text{contacto mayor}} + A_{\text{contacto menor}} - A_{\text{contacto separadores}}$

$$A_{\text{contacto electrolito-placas}} = 168 \text{ cm}^2 + 0.6 \text{ cm}^2 - 3.77 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{contacto electrolito-placas}} = 164.83 \text{ cm}^2$$

Los resultados obtenidos se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 11****Resultados de área de las placas**

NOMBRE	RESULTADO
Área individual de la placa (1 cara mayor)	84 cm <sup>2</sup>
Área total individual de la placa (cara mayor)	168 cm <sup>2</sup>
Área individual de la placa (1 cara menor)	0.6 cm <sup>2</sup>
Área total individual de la placa (cara menor)	2.4 cm <sup>2</sup>
Área individual del separador	0.47125 cm <sup>2</sup>
Área total de contacto del separador con las placas	3.77 cm <sup>2</sup>
Área total individual de contacto de la placa con el electrolito.	164.83 cm <sup>2</sup>

El volumen de las placas del reactor se tiene:

$$V = a \times b \times h$$

$$V = 6 \text{ cm} \times 14 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm}$$

$$V = 8.4 \text{ cm}^3$$

El volumen de los separadores del reactor se tiene:

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

$$V = 3.77 \times 0.2 \text{ cm}$$

$$V = 0.754 \text{ cm}^3$$

El volumen total de los reactores es:

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

$$V = 3.1416 \times (5.5 \text{ cm})^2 \times 18 \text{ cm}$$

$$V = 1710.60 \text{ cm}^3 \text{ ó } V = 1.71060 \text{ litros}$$

El volumen de la cámara para el hidrógeno en los reactores es:

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

$$V = 3.1416 \times (5.5\text{cm})^2 \times 2\text{cm}$$

$$V = 190.10 \text{ cm}^3 \text{ ó } V = 0.19010 \text{ litros}$$

El volumen del electrolito en los reactores es:

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

$$V = 3.1416 \times (5.5\text{cm})^2 \times 16\text{cm}$$

$$V = 1520.531 \text{ cm}^3 \text{ ó } V = 1.520531 \text{ litros}$$

El volumen de la cámara para el hidrógeno en el mini depósito es:

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

$$V = 3.1416 \times (5.5\text{cm})^2 \times 10\text{cm}$$

$$V = 950.332 \text{ cm}^3 \text{ ó } V = 0.950332 \text{ litros}$$

**Tabla 12**

**Volúmenes individuales de las partes del reactor**

	RESULTADO
Volumen individual de la placa	8.4 cm <sup>3</sup>
Volumen individual del separador	0.754 cm <sup>3</sup>
Volumen total de electrolito	3 litros 3000 cm <sup>3</sup>
Volumen total por reactor	1.71060 litros 1710.60 cm <sup>3</sup>
Volumen de electrolito por reactor	1.5205 litros 1520.5 cm <sup>3</sup>
Volumen de la cámara para el hidrógeno	0.1901 litros 190.10 cm <sup>3</sup>

### 3.1.2. Cálculo del flujo del gas hidrógeno – oxígeno

Se inicia los cálculos utilizando los datos que me brinda la batería con el consumo de corriente (A) del sistema y el tiempo (60 segundos=1 minuto) para calcular la carga eléctrica Q del generador:

$$Q = I * t$$

$$Q = 12A * 60s$$

$$Q = 720 [c]$$

Cálculo del peso equivalente del hidrógeno:

$$E = \frac{Pa}{V}$$

$$E = \frac{1(g)}{2(mol)}$$

$$E = 0,5 [mol]$$

Utilizando la fórmula de la ley de Faraday y con todos los datos se calcula el número de moles que posee el hidrógeno:

$$m = \frac{E * I * t}{F}$$

$$m = \frac{0,5(mol) * 12A * 60(s)}{96500(°mol)}$$

$$m = 3,73 * 10^{-3} [mol]$$

Sabiendo el número de moles del hidrógeno se calcula el volumen de gas hidrógeno generado en cada celda con la fórmula de los gases ideales:

$$P * V = n * R * t$$

$$V = \frac{n * R * T}{P}$$

$$3,73 * 10^3 (\text{mol}) * 0,082 (\text{atm} * \text{l}) * 298 (\text{K})$$

$$V = \frac{\text{mol} * \text{K}}{1 \text{atm}}$$

$$V_H = 0,091 \text{l} \text{ ( en cada celda)}$$

$$V = 9,1 * 10^{-8} [\text{m}^3]$$

El volumen total de gas hidrógeno generado se obtiene multiplicando el número de celdas:

### Reactor I

$$V_{\text{totalH}} = 6 * 0,091 \text{l}$$

$$V_{\text{totalH}} = 0,546 \text{l}$$

$$V_{\text{totalH}} = 5,46 * 10^{-7} [\text{m}^3]$$

### Reactor II

$$V_{\text{total H}} = 5 * 0,091 \text{l}$$

$$V_{\text{total H}} = 0,455 \text{l}$$

$$V_{\text{total H}} = 4,55 * 10^{-7} [\text{m}^3]$$

$$V_{\text{total de hidrógeno}} = 5,46 * 10^{-7} \text{m}^3 + 4,55 * 10^{-7} \text{m}^3$$

$$V_{\text{total de hidrógeno}} = 10,01 * 10^{-7} [\text{m}^3]$$

El volumen del gas de oxígeno que se genera, es la mitad del volumen de gas hidrógeno entonces:

$$V = \frac{V_H}{2}$$

$$V = \frac{0,091 (\text{l})}{2}$$

$$V = 0,0455 \text{l} \text{ (en cada celda)}$$

$$V = 4,55 * 10^{-8} [\text{m}^3]$$

Multiplicando el volumen del gas oxígeno por el número de celdas se obtiene el volumen total de gas de oxígeno:

$$V_{totalO} = 5 * 0,0455(l)$$

$$V_{totalO} = 0,2275(l)$$

$$V_{totalO} = 2,275 \times 10^{-7} [m^3]$$

$$V_{totalO} = 4 * 0,0455(l)$$

$$V_{totalO} = 0,182(l)$$

$$V_{totalO} = 1,82 \times 10^{-7} [m^3]$$

$$V_{total\ de\ Oxígeno} = 2,275 \cdot 10^{-7} m^3 + 1,82 \cdot 10^{-7} m^3$$

$$V_{total\ de\ Oxígeno} = 4,095 \cdot 10^{-7} [m^3]$$

Finalmente se suman los volúmenes totales de ambos gases con la finalidad de obtener el flujo de gas Hidrógeno - Oxígeno suministrado por el generador:

$$V_{HHO} = V_{totalH} + V_{totalO}$$

$$V_{HHO} = 4,095 \cdot 10^{-7} m^3 + 10,01 \cdot 10^{-7} m^3$$

$$V_{HHO} = 14,105 \cdot 10^{-7} [m^3]$$

Entonces, el volumen generado de gas HHO es de  $14,105 \cdot 10^{-7} m^3$  (1.4105 l) en un minuto, el cual es enviado directamente hacia la admisión del motor.

**Tabla 13**

**Resultados de volumen de placas**

NOMBRE	RESULTADO
Carga eléctrica de los rectores (R <sub>1</sub> y R <sub>2</sub> )	$Q = 720C$
Peso equivalente del hidrógeno	$E = 0,5 mol$
Moles del hidrógeno	$m = 3.73 \cdot 10^{-3} (mol)$
Gas hidrógeno generado en cada celda	$V_H = 9.1 \cdot 10^{-8} m^3$
Volumen de gas hidrógeno generado R <sub>1</sub>	$V_{totalH} = 5.46 \cdot 10^{-7} m^{-3}$
Volumen de gas hidrógeno generado R <sub>2</sub>	$V_{totalH} = 4.55 \cdot 10^{-7} m^{-3}$
Volumen total de gas hidrógeno generado	$V_{totalH} = 10.01 \cdot 10^{-7} m^{-3}$
Gas oxígeno generado en cada celda	$V = 4.55 \cdot 10^{-8} m^3$
Volumen de gas oxígeno generado R <sub>1</sub>	$V_{totalO} = 2.275 \cdot 10^{-7} m^{-3}$
Volumen de gas oxígeno generado R <sub>2</sub>	$V_{totalO} = 1.82 \cdot 10^{-7} m^{-3}$
Volumen total de gas oxígeno generado	$V_{totalO} = 4.095 \cdot 10^{-7} m^{-3}$
Flujo total de oxígeno – hidrógeno	$V_{totalHHO} = 14.105 \cdot 10^{-7} m^{-3}$

**3.2. Construcción del generador de gas hidrógeno – oxígeno**

En cada uno de los reactores se eligió un mayor número de placas negativas debido

a que en la reacción de la electrólisis el oxígeno se genera en las placas positivas y el hidrógeno en las placas negativas, estas placas están situadas a los extremos del generador intercalando positivas y neutras, de esta manera el gas producido sale con facilidad.

Para una correcta construcción de los reactores se escogió los materiales necesarios y acordes para el mejor rendimiento del reactor de hidrógeno, para la construcción se necesitan los siguientes materiales esenciales:

#### **Tabla 14**

#### **Materiales**

---

Materiales a utilizar para el reactor de hidrógeno

---

Acero inoxidable quirúrgico Coil N. 159397.



Recipiente (Cubeta hermética COLEMAN 10 litros).



Tubo PVC de 11 cm de diámetro.



Tapas para cerrar tuberías tipo hembra de PVC 11 cm de diámetro.



CONTINÚA



Cemento de contacto Africano (Pega amarilla).



Kali pega (Cemento solvente para tuberías y accesorios PVC).



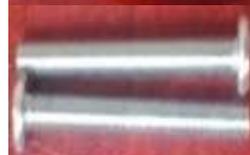
Llave Rinho de ½ pulgada PN 40.



Teflón Albert Meissner de 12 m x ½ in x 0.08 mm.



Pernos de acero inoxidable de 5mm de diámetro x 78 mm de largo.



Pernos de acero inoxidable de 5mm de diámetro x 25 mm de largo



Separadores: Arandelas de caucho



Abrazaderas metálicas de ¾ de pulgada.



Adaptadores tipo hembra de ¼ de pulgada.



CONTINÚA



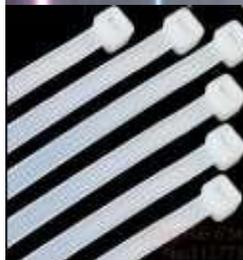
Manguera para gas industrial de 20 bar de presión (300 PSI).



Alambre solido # 12 Phelps rojo y amarillo.



Correas de sujeción



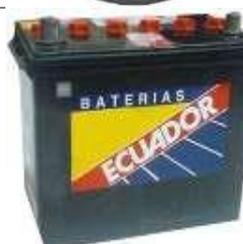
Voltímetro



Amperímetro

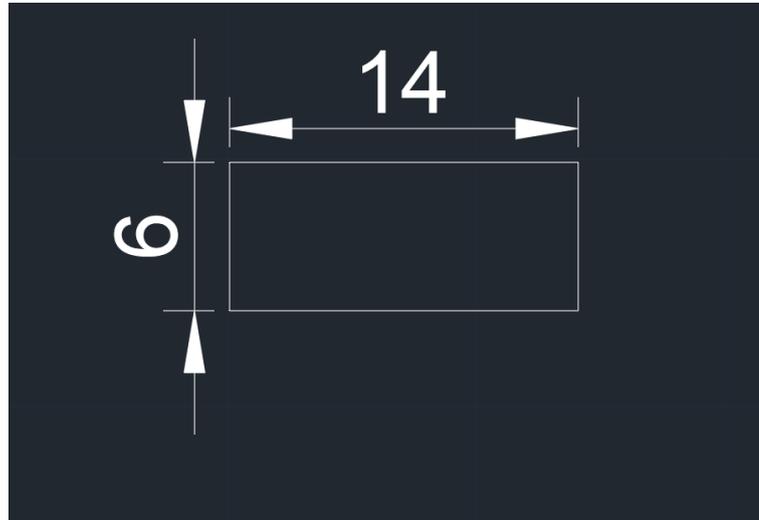


Batería 12 Voltios CC



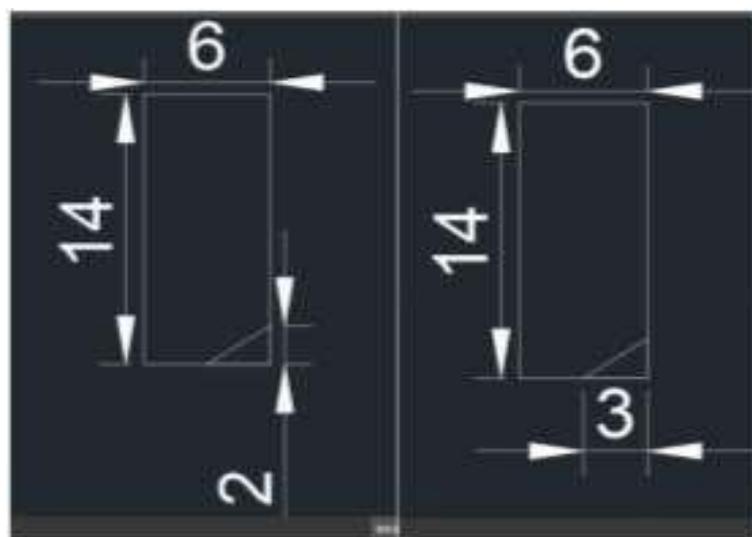
### 3.2.1. Construcción de los electrodos con placas de acero inoxidable quirúrgico.

Se tomó medidas para el cortado del acero inoxidable a una medida de 14 cm x 6 cm, para todas las placas positivas, negativas y neutras.



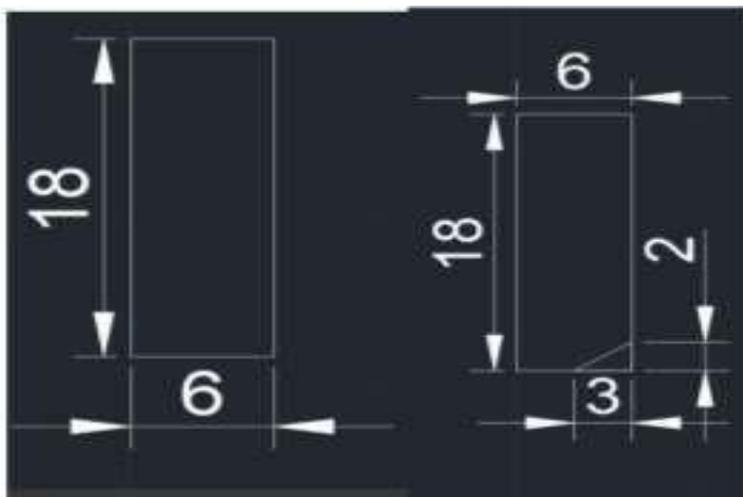
**Figura 27** Rayado de las medidas de las placas de acero inoxidable

Trazamos las medidas de las placas que serán negativas y positivas respectivamente, con un destajo en forma triangular de 3cm de base con 2 cm de altura.



**Figura 28** Rayado de las medidas de las placas positivas y negativas

Se trazó las medidas de las placas que serán negativas y positivas respectivamente, con un destajo en forma triangular de 3cm de base con 2 cm de altura, pero que son más largas para que sirvan como sujetador de las placas y sean conectadas a la corriente eléctrica positiva y negativa.



**Figura 29** Rayado de las medidas de las placas negativas y positivas de soporte

Se cortó los separadores cilíndricos de caucho de 2mm de espesor x 30mm de diámetro en 8 partes, para que el electrolito tenga mayor contacto con las placas y sea mejor la separación del hidrógeno y oxígeno.



**Figura 30** Corte de los separadores

Se forman las placas comenzando con una negativa (estas es la que separa el hidrógeno y en la combustión de la gasolina es el hidrógeno quién explota).



**Figura 31 Placa negativa de acero inoxidable con soporte**

Después se colocó separadores con silicona líquida para que estos no se muevan y queden sujetos a la placa.



**Figura 32 Pegado de separadores con silicona líquida**

Se colocó luego la placa sin modificaciones, estas serán las neutras y ayudarán en la disipación del calor del electrolito.



**Figura 33 Placa neutra**

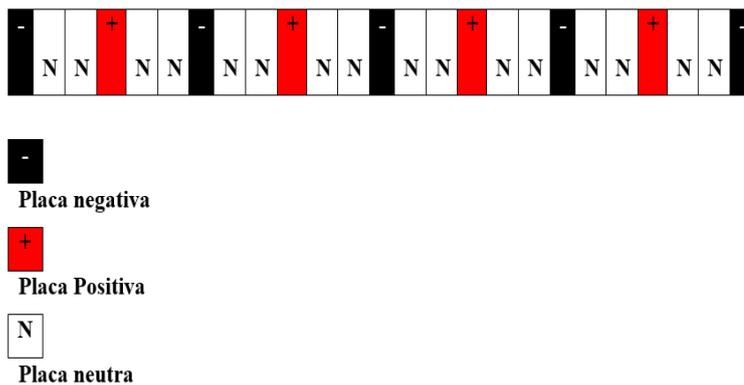
Se sigue con los separadores, luego otra placa neutra, separadores, placa positiva, separadores, placa neutra, separadores, placa neutra, separadores, placa negativa y así sucesivamente hasta generar un electrodo con 5 placas negativas, 4 positivas, y 16 placas neutras.



**Figura 34 Disposición de las placas**

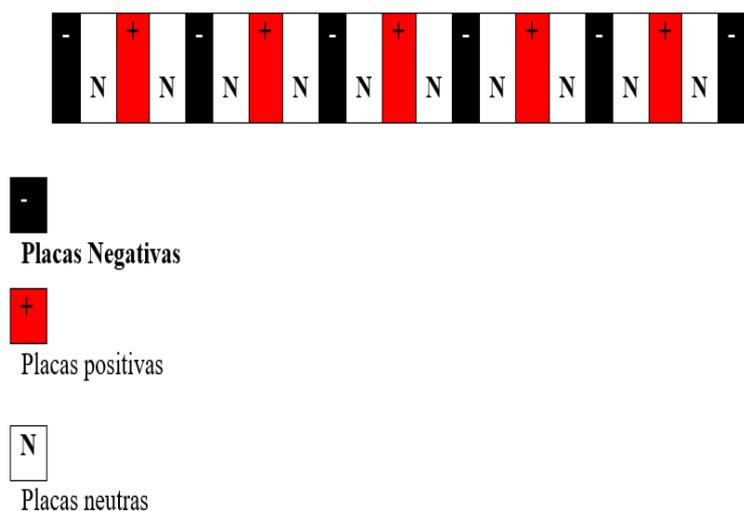
Al final se tiene dos conjuntos de electrodos, positivos y negativos. Para experimento se tomó dos disposiciones:

El primero se trabajó con dos neutros en la separación de cada electrodo entre positivo y negativo. De la siguiente manera:



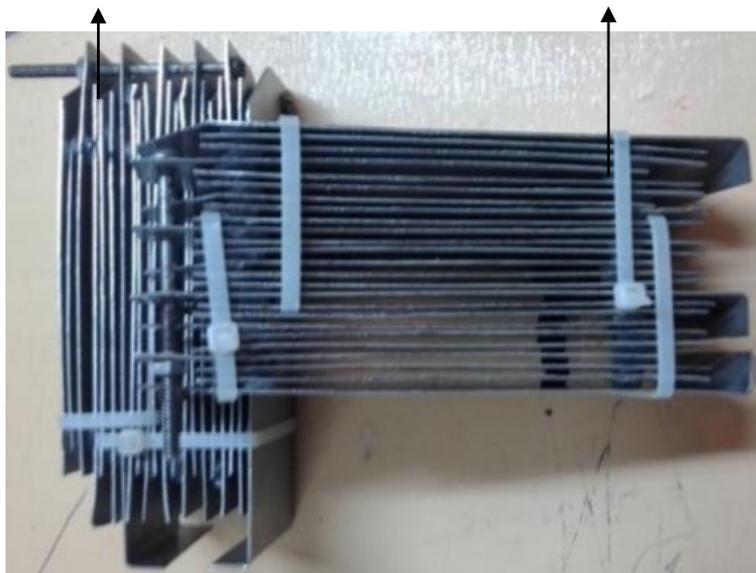
**Figura 35 Disposición de los electrodos con dos placas neutras**

En el segundo, la disposición es de solo una placa neutra de separación, en la misma que se pudo constatar la presencia de más hidrógeno, donde la explosión se produjo más fuerte, verificando que el electrodo negativo es el que descompone al hidrógeno presente en el agua.



**Figura 36 Disposición de los electrodos con una placa neutra**

Disposición con una placa neutra    Disposición con dos placas neutras



**Figura 37**    Placas negativas, positivas y neutras

### 3.2.2. Construcción de los depósitos del reactor 1 (R1) y reactor 2 (R2)

Para el almacenamiento del electrolito del R<sub>1</sub> y R<sub>2</sub> de cada uno de los electrodos se utilizará tubo PVC de 11 cm de diámetro.



**Figura 38**    Tubo PVC (Policloruro de Vinilo)

El tubo PVC se cortó en dos pedazos de 18 cm de largo y uno de 10 cm de largo. Los dos primeros pedazos para los reactores principales donde van alojados los electrodos positivos, negativo con sus respectivas placas neutras y el tercero para el mini depósito de hidrógeno, el mismo que está encargado también de unir el hidrógeno-oxígeno que se obtiene de los dos reactores principales.



**Figura 39 Corte del tubo PVC**

Los depósitos principales de hidrógeno solamente se conforman del tubo PVC de 11 cm de diámetro x 18cm de altura con su respectivo tapón tipo hembra de 11 cm de diámetro, con una salida hacia un burbujeador y recolector de hidrógeno.



**Figura 40 Reactores de hidrógeno principales de PVC.**

En el proceso del diseño las fugas fueron muchas y se buscó maneras de mejorar esto, para mejor seguridad de fugas de hidrógeno, se incorporó caucho con cemento de contacto en la superficie extrema interna de todas de las tapas tipo hembra de 11cm de diámetro de PVC.



**Figura 41** Pegado de caucho a la tapa de PVC.

Elementos listos para ser ensamblados según su trabajo y operación en el sistema principal.



**Figura 42** Elementos del sistema principal.

### 3.2.3. Construcción del mini depósito de hidrógeno

Para este mini depósito se utilizó el tubo PVC cortado de 10 cm de largo por 11 cm de diámetro, el mismo que se encargará de recolectar el hidrógeno generado por  $R_1$  y  $R_2$ . Luego, se procede a colocar los adaptadores tipo hembra en cada uno de las tapas y depósitos de hidrógeno con la ayuda de un playo de presión, sellando y evitando fugas de hidrógeno con teflón.



**Figura 43** Adaptador de salida de hidrógeno del mini depósito.

Mini depósito de almacenaje de hidrógeno, donde se utilizó dos tapas PVC tipo hembras con dos salidas de hidrógeno y solamente una entrada de hidrógeno.



**Figura 44** Mini depósito de hidrógeno de tubo PVC.

Para el burbujeador se utilizó reciclaje, un recipiente de café buen día. Haciendo sus respectivas adecuaciones de un burbujeador funcionó a perfección gracias a su hermeticidad.



**Figura 45** Burbujeador

Al depósito principal se le hace perforaciones necesarias donde se incluirá la entrada de electricidad negativa y positiva del rector, además de los elementos de medición como el amperímetro y voltímetro.



**Figura 46** Perforación del block de elementos

### 3.3. Acoplamiento de las partes

Se acopló los electrodos a las tapas de PVC, con rodela de caucho para ayudar con la hermeticidad con los pernos de 5mm de diámetro x 25 mm de largo con sus respectivos pernos. Cabe recordar que el número de placas negativas es mayor en 1 placa a las positivas, debido a que en el polo negativo se genera el hidrógeno, y es precisamente este elemento el necesario para que el motor de la motocicleta funcione correctamente en reemplazo de la gasolina.



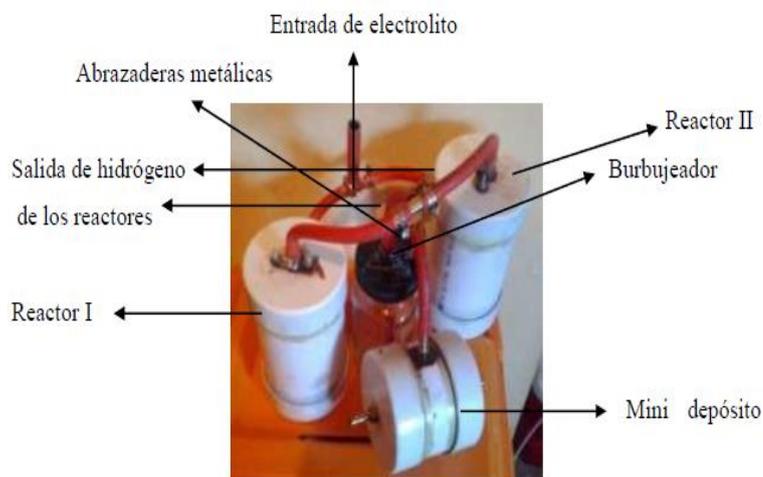
**Figura 47** Acople de los electrodos a la tapa PVC.

Se pegó la tapa tipo hembra a los tubos PVC previamente cortados con cemento Kali pega solvente para tuberías y accesorios PVC.



**Figura 48** Acople de la tapa tipo hembra al tubo PVC

Este proceso se realizó con el otro reactor, a la final con todos los componentes ya ensamblados con sus respectivos conductos se obtiene el siguiente sistema principal de producción de hidrógeno.



**Figura 49 Sistema principal del reactor de hidrógeno.**

Los reactores principales  $R_1$  y  $R_2$  en los cilindros llevan a cabo la electrólisis del agua (Descomposición del agua en dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno), a una presión de 1 atmósfera y a una temperatura ambiente de 20 grados Celsius.

En el mini depósito se recoge el hidrógeno-oxígeno generado en los reactores principales y los une para llevarlos a un depósito de almacenamiento volumétrico mayor.

El burbujeador permite purificar el hidrógeno-oxígeno producido, además que no permite el paso de alguna chispa que haga explotar el sistema de generación de hidrógeno.

Las mangueras de gas ayudan al traslado del hidrógeno en condiciones estables y sin fugas hacia los respectivos depósitos del reactor.

Las abrazaderas metálicas no permiten fugas del hidrógeno al ambiente en los

puntos de uniones con los componentes del reactor.

### **3.4. Diseño del circuito eléctrico**

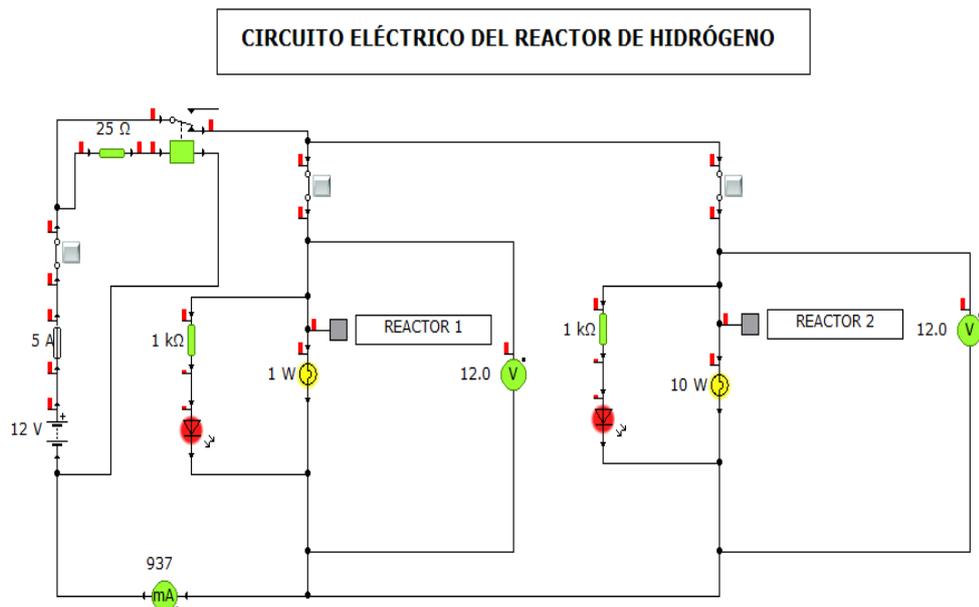
Para el circuito se utiliza dos interruptores para mayor seguridad que permitan encender y apagar el sistema principal con el generador I y el generador II.

El primero corresponde al interruptor de contacto del sistema principal que permite encender junto con el reactor I principal.

El segundo interruptor sirve para encender o apagar el generador II.

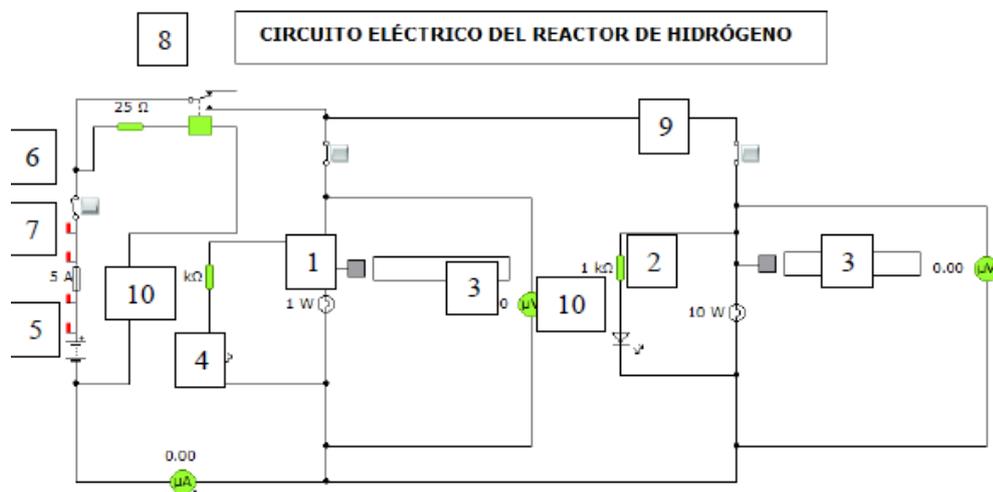
El circuito trabaja con 12 A para ello se coloca un elemento de seguridad: un fusible de 16 A que limita la corriente máxima. También se utiliza un amperímetro y un voltímetro de corriente continua para poder visualizar la tensión e intensidad que está circulando por los generadores de hidrógeno.

Para tener un mayor control visual, se incluyen varios diodos leds para comprobar el estado de funcionamiento del circuito. A continuación, se muestra el esquema eléctrico con el cual funciona el generador de HHO.



**Figura 50** Esquema eléctrico

Se muestra el esquema eléctrico apagado de todo el sistema de producción de hidrógeno, con sus respectivos componentes numerados y citados.



**Figura 51** Elementos del sistema eléctrico

- |                                     |                          |
|-------------------------------------|--------------------------|
| 1. Reactor II (secundario-de apoyo) | 4. Amperímetro           |
| 2. Voltímetro                       | 5. Baterías de 12 V CC   |
| 3. Reactor I (principal)            | 6. Interruptor principal |

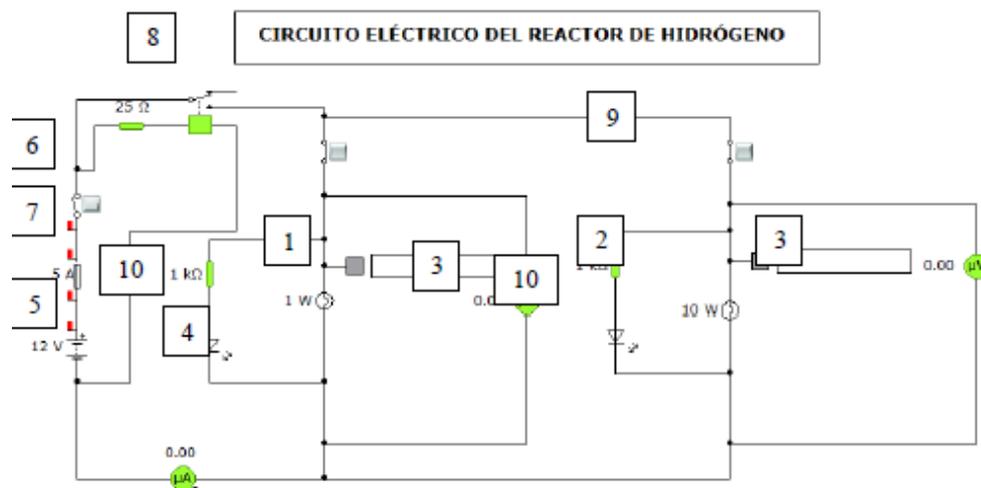
7. Fusible de 16 A

9. Interruptor secundario

8. Relé

10. Diodos leds

Esquema eléctrico del sistema de generación de hidrógeno con solo el reactor I principal encendido y el secundario apagado.



**Figura 52** Esquema eléctrico funcionando  $R_1$

El amperímetro y el voltímetro se implementan al block de elementos con la finalidad de medir la corriente (A) y el voltaje (V) que circula por todo el sistema de generación de hidrógeno.

Tomando en consideración que el voltímetro se lo conecta en paralelo con los reactores y el amperímetro en serie al final del circuito se lleva a cabo la conexión de estos instrumentos de medición.



**Figura 53 Voltímetro y amperímetro**

Se instala el circuito eléctrico que permite la descomposición del agua, conectados estos en paralelo según como se muestra la figura.



**Figura 54 Conexión eléctrica  $R_1$  y  $R_2$ .**

Se incorpora el sistema principal al depósito principal de abastecimiento

electrolítico, el electrolito simplemente se compone de agua purificada (cero minerales) con sosa cáustica (KOH) en proporciones adecuadas, cabe recalcar que mientras más sosa cáustica mejor el paso de corriente y consigo mejor separación de los elementos oxígeno e hidrógeno.



**Figura 55** Instalación del sistema principal a la cuba electrolítica.

### **3.5. Instalación del sistema de generación hidrógeno – oxígeno al motor de combustión interna.**

Finalizado la construcción y el ensamblaje total de las partes del reactor se procede a la instalación e incorporación de los componentes tanto del sistema eléctrico como de la generación de gas hidrógeno - oxígeno en el motor de combustión interna, tomando en consideración algunos puntos importantes de seguridad en la manipulación de este gas que es altamente inflamable.

#### **3.5.1. Instrucciones de seguridad.**

- Estar en buen estado de ánimo, sin haber ingerido alcohol.
- Regirse al circuito eléctrico debidamente diseñado.
- No estar en presencia de los niños.
- No manipular fuego mientras se produzca en el generador gas hidrógeno.
- Tener desconectado el sistema eléctrico de la fuente de energía.

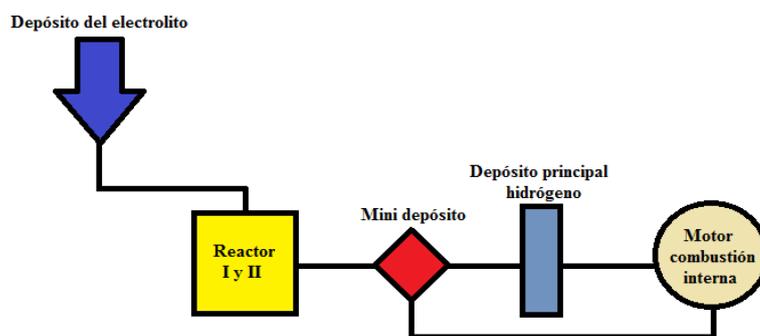
- No trabajar con el motor a temperatura normal de funcionamiento.
- Usar gafas y guantes en todo momento.
- Utilizar las herramientas adecuadas para la instalación.
- Verificar que el sistema eléctrico no produzca chispas.
- Sujetar las abrazaderas correctamente evitando fugas.
- Verificar el correcto funcionamiento del sistema generador de hidrógeno.

### 3.5.2. Consideraciones iniciales

Al momento del funcionamiento del motor, este crea un vacío gracias al pistón, el mismo que absorbe aire y combustible al interior del cilindro de combustión, este vacío generado por el pistón es el que se aprovecha para introducir el gas hidrógeno – oxígeno del reactor en la admisión del motor, donde se mezcla con la gasolina en la cámara de combustión del cilindro, se quema conjuntamente con el combustible y el aire aspirado por el motor. Esta mezcla es más eficiente que la combustión de la gasolina, dando como resultado un rendimiento elevado del motor y una disminución considerable de las emisiones contaminantes que es la parte fundamental de la presente investigación.

### 3.5.3. Proceso de instalación del sistema

A continuación, se muestra el circuito general del sistema de generación de hidrógeno y por donde circula el gas  $H_2$  desde  $R_1$  y  $R_2$  hacia el motor.



**Figura 56** Circuito general del reactor

Para instalar el sistema de generación de gas hidrógeno-oxígeno en la motocicleta de paseo serie Ranger se utiliza los siguientes materiales y herramientas:

- Playo de presión
- Destornilladores (Plano y estrella)
- Alicata
- Juego de llaves milimétricas
- Pernos tuercas y tornillos
- Abrazaderas de plástico

El block del reactor de hidrógeno conjuntamente con todos sus elementos se instala en la parte trasera de la motocicleta, donde no existen fuentes de calor, cables de conexiones eléctricas que obstaculicen su operación y tampoco fugas de algún líquido.



**Figura 57** Fijación del generador del gas HHO

### 3.5.4. Depósito principal de almacenamiento de hidrógeno.

Para colocar el depósito principal de almacenamiento de hidrógeno se debe tener en cuenta que debe estar en un lugar libre de alguna chispa externa y sin interrumpir el funcionamiento normal de la motocicleta. Tomadas las consideraciones esenciales el recipiente se lo ubicó en la parte posterior (atrás) del asiento del piloto, por debajo y cerca del reactor principal.



**Figura 58** Fijación del depósito y burbujeador

### 3.5.5. Sistema de control.

El sistema de control se lo instaló en el block de elementos, considerando la medición instantánea del consumo de corriente de cada reactor, así como del voltaje circulante en el sistema eléctrico de los reactores. Para la instalación del sistema eléctrico y de control se recurrió a la figura 50 para realizar las conexiones necesarias y poner a punto el generador. El cableado que se eligió es rojo para el positivo y amarillo para el negativo.

### 3.6. Solución electrolítica.

Primeramente, se determinó mediante pruebas previas que, a más sosa cáustica mezclada con cada litro de agua destilada, mejor conductividad de corriente, mejor la descomposición del agua (electrolisis) dando como resultado final mejor la generación de hidrógeno que se produce. Con la conclusión anotada anteriormente se llegó a un patrón estable de por cada litro de agua destilada se mezclará con 25 gr de hidróxido de potasio (KOH).

En el diseño de los depósitos de los reactores la capacidad volumétrica de cada uno de ellos se especifica en la siguiente tabla:

**Tabla 15**

#### **Volumen total de la cámara del reactor.**

NOMBRE	RESULTADO
Volumen total por reactor	1.71 litros 1710.60 cm <sup>3</sup>
Volumen de electrolito por reactor	1.52 litros 1520.5 cm <sup>3</sup>
Volumen de la cámara para el hidrógeno	0.19 litros
	190.10 cm <sup>3</sup>

En esta tabla se observa que se considera un volumen de electrolito de 1,5205 litros por cada reactor y un volumen destinado para el gas hidrógeno-oxígeno resultado de la descomposición de 0.1901 litros.

Con esta aclaración se nota que los litros totales de electrolito que se debe preparar son: 3 litros de agua destilada con 75 gramos de sosa cáustica.

### 3.7. Verificación de operación del sistema

Finalizado la instalación de cada uno de los elementos del sistema, instalación del reactor a la motocicleta, incorporación del electrolito en los reactores se procede a la verificación de operación del reactor y funcionamiento de la motocicleta. Para la

verificación de operación se va a proceder de la siguiente manera:

- Prender la motocicleta.
- Verificar el funcionamiento normal de la motocicleta durante 10 minutos.
- Cambiar la posición Off a On del interruptor principal del reactor.
- Dejar el paso de salida final del hidrógeno hacia el motor durante 30 segundos mientras sale el aire del interior del sistema del reactor.
- En ese tiempo de 30 segundos verificar que los instrumentos de medición voltímetro y amperímetro marquen 12 voltios y 12 amperios, respectivamente.
- Cerrar el paso de salidas del hidrógeno hacia el motor en un lapso de 1 minuto mientras el hidrógeno producido por los reactores se almacena en los depósitos diseñados.
- Cumplido el tiempo de llenado de hidrógeno, abrir el paso principal de hidrógeno hacia el motor.
- El paso de hidrógeno secundario permite un mayor ingreso volumétrico de hidrógeno al motor, tratando así simular una aceleración del motor.
- Verificación total de los elementos del reactor y su óptimo desempeño.

Además, se puede notar que, si el amperímetro marca una caída a 5 amperios o menos, el generador necesita ser recargado con agua destilada o agua de lluvia, tomando en consideración que la recarga debe hacerse con el generador encendido.

### **3.8. Mantenimiento del sistema de generación de gas**

Ya instalado el sistema en la motocicleta se debe realizar un mantenimiento periódico para evitar cualquier tipo de avería y así prolongar la vida útil del generador de gas hidrógeno.

### **3.8.1. Nivel de agua destilada**

El nivel del agua debe controlarse con regularidad cada 150 km, debido a que el depósito hace las veces de burbujeador, el agua del depósito limpia de impurezas del gas HHO que sale del generador que podrían ir al motor y acortaría su vida útil. Con el nivel adecuado el generador trabaja con su máxima eficiencia (siempre se abastecerá el depósito con el generador de gas HHO encendido), nunca deberá pasar el límite máximo de agua del depósito.

## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Introducción

En este capítulo se procede a verificar los efectos producidos por el sistema de generación de gas hidrógeno – oxígeno obtenidos por electrolisis del agua con un reactor diseñado para el efecto, análisis de cada uno de los parámetros característicos del motor de combustión interna de la motocicleta de paseo serie Ranger como el torque, potencia, consumo de combustible y emisión de gases. Dichos análisis se realizan con la ayuda de un dinamómetro eléctrico y un analizador de gases.

En primera instancia se realizará pruebas con el motor de la motocicleta en condiciones normales de funcionamiento, es decir, con el sistema de alimentación convencional del motor (alimentado por gasolina). Posteriormente, el análisis se ejecuta en el sistema dual gasolina – hidrógeno. Finalmente se realiza una comparación de los parámetros analizados en ambas condiciones mediante tabulación de datos obtenidos.

#### 4.2. Equipos

Para las pruebas técnicas del motor de fuerza, torque y potencia se las realizó en el banco de pruebas Villers F15 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ubicado en el Laboratorio de Motores de Combustión Interna de la carrera de Mecánica (DECEM). Así mismo para realizar los análisis de mediciones de gases se usó un equipo marca Brain Bee AGS-688 en un motor de combustión interna a gasolina de una motocicleta de paseo serie Ranger de 110 cc.

##### 4.2.1. Dinamómetro de resistencias eléctricas motor Villers F15.

El Banco de Pruebas Villers F15 se encuentra ubicado en el laboratorio de Motores de Combustión Interna de la carrera de Mecánica (DECEM) en la Universidad de las Fuerzas Armas ESPE - SANGOLQUÍ, mismo dinamómetro que cuenta con las

siguientes características técnicas:



**Figura 59 Banco de Pruebas Villers F15**

**Tabla 16**

**Características técnicas**

Banco de Pruebas Villers F15	
Marca	PLINT
Modelo	5236
Voltaje	220
Refrigerante	DC
Combustible	Gasolina

**Fuente:** (Gómez & Vega, 2015)

Según Gómez & Vega (2015) manifiestan: “Se pueden acoplar dos tipos de motores a este, un motor a gasolina marca Villers o un motor a diésel marca Petter, que se le acopla a un dinamómetro eléctrico con las siguientes características técnicas” (pág. 72)

**Tabla 17**

**Dinamómetro Villers F15**

Parámetros	Gasolina
Modelo	Villers F15
Cilindrada	147
Diámetro del cilindro (mm)	65
Carrera (mm)	44
Torque (Nm)	6.5
Potencia (Hp)	3.3
Tiempos	4
Número de cilindros	1
Velocidad máxima (RPM)	3600

**Fuente:** (Gómez & Vega, 2015)

#### 4.2.2. Analizador de gases QGA 6000.

Para realizar los análisis de gases se usó la motocicleta de paseo Serie Ranger de 110 cc. Los parámetros medidos son: emisiones de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub> y material particulado emitido, en forma estática.

Se realizaron las mediciones usando un analizador de gases QGA 6000 perteneciente al taller automotriz Turbo Diagnostic en la ciudad de Quito.



**Figura 60** Analizador de gases QGA 6000

**Fuente:** (Altamirano & Pabón, 2016)

Altamirano & Pabón (2016), acotan: “De acuerdo al manual de usuario del equipo, el analizador posee las siguientes características:” (pág. 94)

- Aspiración gas de medición 4 l/min.
- Prueba de estanqueidad semiautomática con cierre manual de la sonda extracción gas
- Control del flujo automático
- Control sensor O<sub>2</sub> acabado automático
- Compensación automática de la presión Ambiente de 85,0 a 106,0 kPa

- Calibración automática (con bombona gas muestra)
- Autocero automático
- Tiempo de calentamiento de 20 °C 10 minutos máx.
- Tiempo de respuesta CO, CO<sub>2</sub> y HC < 15 segundos
- Entrada temperatura aceite por PT100, o vía radio wireless.
- Conexiones seriales: PC USB B (slave mode); PC RS 232 (9600, 8, N, 1); PC en red RS485 (9600, 8, N, 1)
- Visualización mediante 6 displays LCD con 4 dígitos alfanuméricos con retroiluminación
- Impresora térmica con 24 columnas integrada
- Alimentación 12 Voltios DC típica (11 ÷ 15 VDC)
- Consumo 1.5A DC (3 A en impresión)
- Temperatura de funcionamiento de 5 a 40 °C
- Humedad relativa 10 ÷ 95 %
- Temperatura de almacenamiento de -20 a 60 °C
- Dimensiones 434X190X291 mm.

#### **4.2.3. Motocicleta Ranger 110 cc.**

El estudio realizado de la descomposición del hidrógeno por la electrolisis del agua, dio como resultado la utilización de un motor de baja cilindrada, mismos reactores que generan hidrógeno suficiente para hacer funcionar un motor en un rango de cilindrada de 50 cc hasta 150 cc.

Por la característica de consumo de combustible utilizado en un motor de baja cilindrada se escoge a la motocicleta de 110 cc para utilizar los reactores y hacerla funcionar con el hidrógeno generado, características técnicas y de fabricación se detallan a continuación:

**Tabla 18****Características técnicas de la motocicleta**

Motocicleta de paseo serie Ranger 110 cc.	
Placa	HE 422R
Origen del vehículo	Producción Nacional
Combustible	Gasolina
Marca	Ranger
País de origen	Ecuador
Color Primario	Negro
Color secundario	Negro
Clase	Motocicleta
Tipo	Paseo
Tonelaje	0.25 T
Pasajeros	1
Servicio	Particular
No de motor	1P52FMHAA031772
Año de fabricación	2010
Modelo	110 GM
Carrocería	Metálica
DUI	M00005716

**4.3. Pruebas de potencia y torque**

El dinamómetro eléctrico utilizado es del laboratorio de motores de combustión interna de la ESPE matriz Sangolquí, que mediante resistencias eléctricas permite monitorear el comportamiento de la fuerza generada por el motor, para posteriormente calcular el torque y potencia generado mediante fórmulas establecidas.

En este banco de pruebas (dinamómetro eléctrico) se obtendrá los siguientes datos:

- Tiempo de consumo de combustible
- Volumen de gasolina
- Fuerza torsional generada
- Consumo másico de aire
- Temperatura de gases de escape
- Número de revoluciones

En la utilización del banco de pruebas se debe tener en consideración los siguientes aspectos de importancia:

- Manipular el equipo solo con personal autorizado.
- Revisar previamente que el circuito de encendido del banco de pruebas esté debidamente conectado.
- Revisar de igual manera el sistema de alimentación de gasolina hacia el motor de combustión interna.
- Utilizar elementos de seguridad (Orejas, guantes, gafas)
- Tomar como referencia el consumo de  $25 \text{ cm}^3$  de gasolina.

Con este procedimiento previo se realizó las pruebas pertinentes utilizando gasolina extra de 87 octanos tomando como datos esenciales los siguientes que se presenta en la siguiente tabla, datos obtenidos del dinamómetro eléctrico con una aceleración constante del motor al 100%:

**Tabla 19**

**Datos obtenidos del dinamómetro utilizando gasolina convencional.**

Velocidad (V)	Fuerza (F)	Tiempo de consumo de combustible (t)	Consumo másico de aire (h0)	Temperatura de gases de escape (TE)	Número de revoluciones (#)
Revoluciones por minuto	Newton	Segundos	Kg/Hrs	Grados Celsius	Revoluciones por segundo
4000	12	91	6.72	400	6062
3800	14.1	83.8	6.71	407	5311
3600	14.1	87.7	6.14	410	5263
3400	15.1	91.1	8.31	406	5164
3200	15.5	96.6	7.53	401	5157
3000	15.9	104.2	5.95	394	5213
2800	16.3	110.4	5.40	385	5161
2600	16.5	121.3	4.55	373	5263
2400	16.9	129.8	4.39	358	5198
2200	16.5	140.9	3.47	347	5178
2000	16.7	161.4	3.06	332	5393
Promedios	15.42	110.75	5.66	383	5305.72

Para la medición de todos estos parámetros característicos del motor de combustión interna utilizando gasolina extra de 87 octanos se le aplicó una carga por medio de una resistencia eléctrica, misma que permitió ir bajando la velocidad del motor 2000 revoluciones por minuto en cada medición, con la referencia del consumo de combustible de 25 cm<sup>3</sup>.

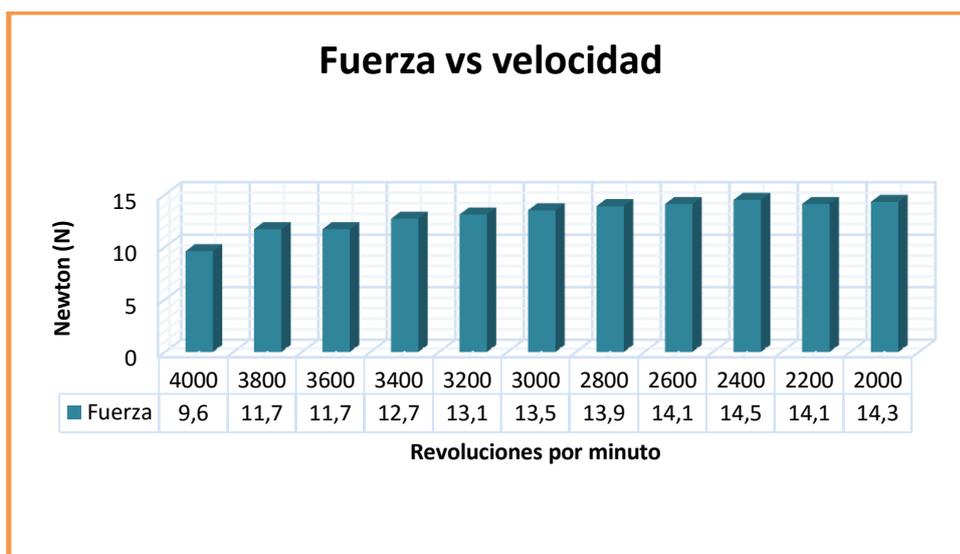
La fuerza generada por el motor de combustión interna al aplicarle carga por medio de un motor eléctrico permite la medición en Newton de la fuerza torsional generada para vencer esta carga y así producir un trabajo. A esta fuerza obtenida del banco de pruebas se le resta 2,4 N porque en el software no marca desde cero, sino que viene con ese margen de error.

**Tabla 20**

**Datos de la velocidad vs fuerza torsional real producida.**

Velocidad (v)	Fuerza (F)	Margen de error (F)	Fuerza Real (F)
Revoluciones por minuto (rev/min)	Newton (N)	Newton (N)	Newton (N)
4000	12	2.4	9.6
3800	14.1	2.4	11.7
3600	14.1	2.4	11.7
3400	15.1	2.4	12.7
3200	15.5	2.4	13.1
3000	15.9	2.4	13.5
2800	16.3	2.4	13.9
2600	16.5	2.4	14.1
2400	16.9	2.4	14.5
2200	16.5	2.4	14.1
2000	16.7	2.4	14.3
Promedio	15.42	2.4	13.02

Con estos datos obtenidos se observa el comportamiento del motor a diferentes velocidades y la fuerza que debe ejercer ante una carga. En la siguiente figura se muestra tal comportamiento.



**Figura 61 Fuerza ejercida por el motor vs velocidad.**

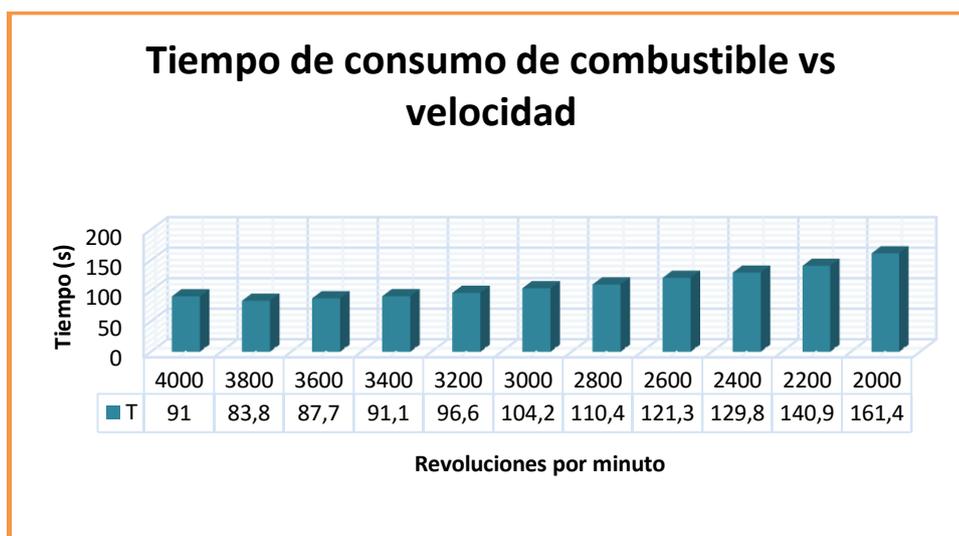
De la misma manera se tomó el tiempo de consumo de combustible con el motor quemando 25 cm<sup>3</sup> de gasolina extra de 87 octanos.

**Tabla 21**

**Datos de la velocidad vs tiempo del consumo de combustible.**

Velocidad (v)	Tiempo del consumo de Combustible (t)
Revoluciones por minuto	Segundos
4000	91
3800	83.8
3600	87.7
3400	91.1
3200	96.6
3000	104.2
2800	110.4
2600	121.3
2400	129.8
2200	140.9
2000	161.4
Promedios	110.75

Se presenta el gráfico de la variación que sufre en el tiempo al combustionar 25 cm<sup>3</sup> de gasolina extra en el interior del cilindro del motor.



**Figura 62** Tiempo del consumo de combustible vs velocidad.

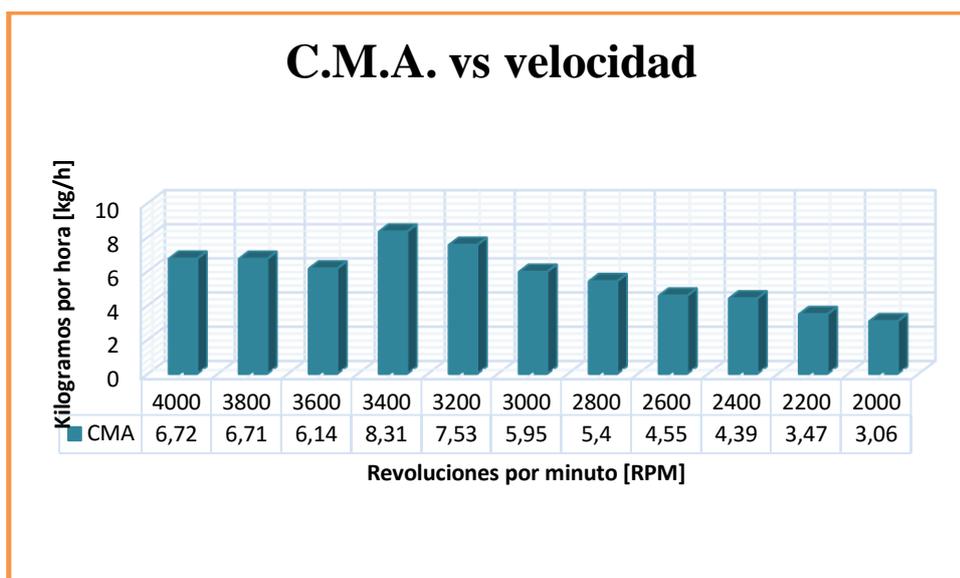
Mediante un sensor MAF de uso automotriz se logra medir el consumo de aire que necesita el motor para combustionar con la gasolina extra.

**Tabla 22**

**Datos de la velocidad vs consumo másico de aire.**

Velocidad (v)	Consumo másico de aire (h0)
Revoluciones por minuto	Kg/Hrs
4000	6.72
3800	6.71
3600	6.14
3400	8.31
3200	7.53
3000	5.95
2800	5.40
2600	4.55
2400	4.39
2200	3.47
2000	3.06
Promedios	5.66

De la misma forma se presenta el gráfico del consumo de aire a distintas velocidades, tomando las mediciones en kilogramos por una hora de trabajo del motor.



**Figura 63 Consumo másico de aire vs velocidad.**

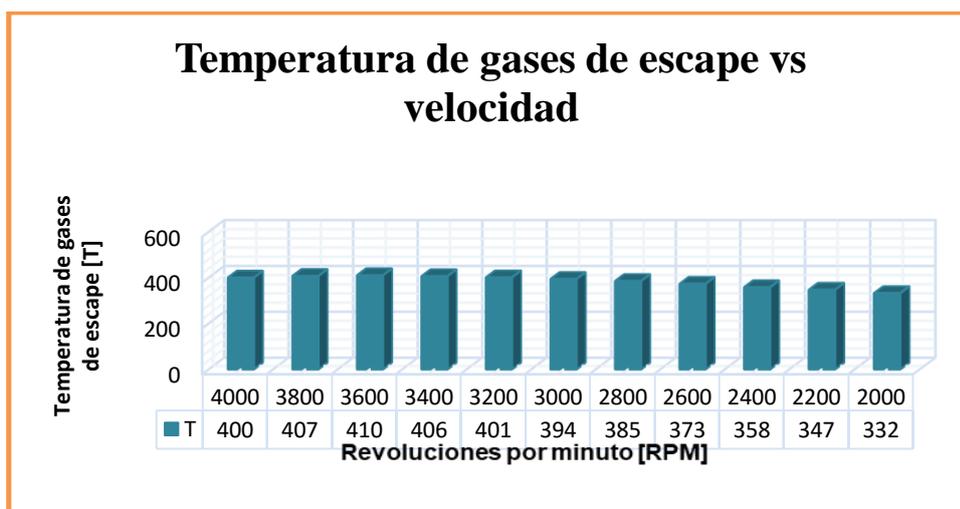
Una medición importante también es saber que temperatura genera la combustión interna del motor, donde se puede ver la pérdida de energía que se produce en forma de calor.

**Tabla 23**

**Datos de la velocidad vs temperatura de los gases de escape.**

Velocidad (v)	Temperatura de gases de escape (TE)
Revoluciones por minuto	Grados Celsius (°C)
4000	400
3800	407
3600	410
3400	406
3200	401
3000	394
2800	385
2600	373
2400	358
2200	347
2000	332
Promedios	383

A continuación, la gráfica de las distintas temperaturas producto de la combustión del aire con el combustible en el interior del cilindro del motor.



**Figura 64** Temperatura de gases de escape vs velocidad.

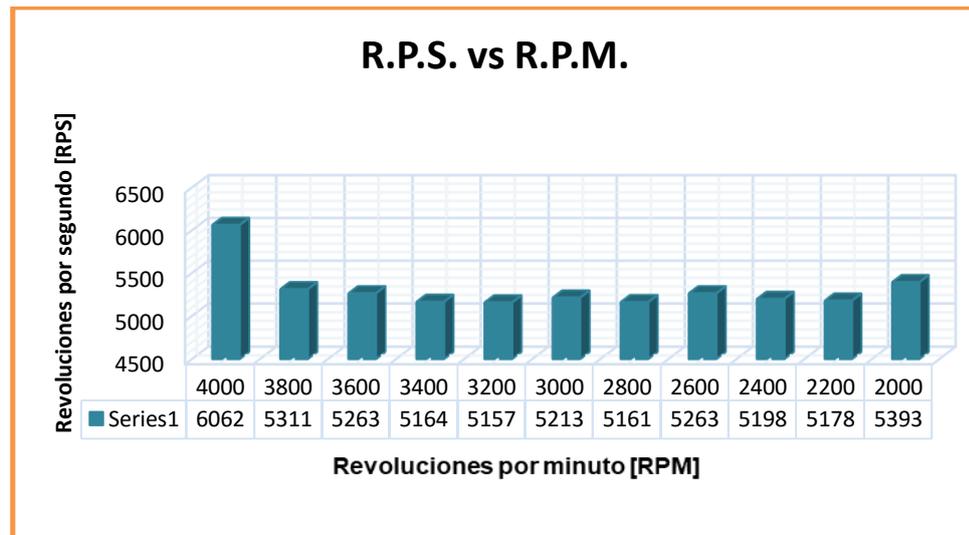
En la siguiente tabla se muestra el número de revoluciones por segundo que tarda el motor de combustión interna en consumir 25 cc de gasolina.

**Tabla 24**

**Datos de la velocidad vs número de revoluciones.**

Velocidad (v)	Número de revoluciones (#)
Revoluciones por minuto	Revoluciones por segundo
4000	6062
3800	5311
3600	5263
3400	5164
3200	5157
3000	5213
2800	5161
2600	5263
2400	5198
2200	5178
2000	5393
Promedios	5305.72

La medición de las revoluciones por segundo que se produce en consumir 25 cm<sup>3</sup> de gasolina permitirá calcular la relación aire combustible más adelante.



**Figura 65**      **Revoluciones por segundo vs revoluciones por minuto.**

Con estos datos obtenidos del banco de pruebas y mediante fórmulas ya preestablecida se procede a calcular:

- Torque (T)
- Potencia (P)
- Relación aire – combustible (A/C)

En el caso del cálculo del torque promedio total se multiplica la fuerza generada del motor para vencer una carga torsional aplicada por el brazo de palanca (radio de manivela de 265 mm).

Con el promedio de la fuerza torsional generado por el motor de combustión interna se calculó el torque promedio generado.

$$T = Fxd$$

$$T = \frac{(F - 2, 4) \times (265mm) \times (1m)}{1000mm}$$

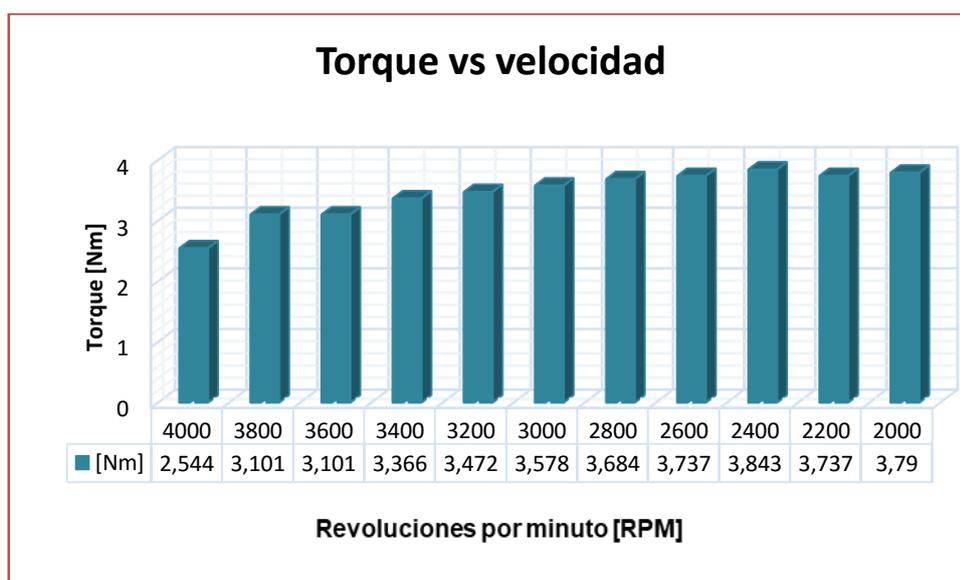
$$T = \frac{(15, 42 \text{ t } 2, 4) \times (265mm) \times (1m)}{1000mm}$$

$$T = 3, 4503Nm$$

**Tabla 25****Datos de la velocidad vs número de revoluciones.**

Velocidad (v)	Fuerza Real (F)	Torque (T)
Revoluciones por minuto	Newton	Nm
4000	9,6	2,544
3800	11,7	3,1005
3600	11,7	3,1005
3400	12,7	3,3655
3200	13,1	3,4715
3000	13,5	3,5775
2800	13,9	3,6835
2600	14,1	3,7365
2400	14,5	3,8425
2200	14,1	3,7365
2000	14,3	3,7895
Promedio	13,02	3,4503

A continuación, se presenta el gráfico de los diferentes torques que se fue generando mientras se reducía la velocidad en un rango de 2000 revoluciones por minuto aplicando una carga torsional por medio de un motor eléctrico con resistencias.

**Figura 66** Fuerza ejercida por el motor en función de las revoluciones.

En el gráfico del torque generado por el motor se puede constatar que el par motor máximo (pico máximo) generado es a una velocidad de 2400 revoluciones por minuto con un torque de 3.8425 Nm, así también con un torque mínimo de 2,544Nm a 4000 revoluciones por minuto.

#### 4.4. Cálculo de la velocidad angular

Para calcular la velocidad angular generada por el motor se necesita el número de vueltas que da la manivela en un determinado tiempo y todo esto en base al consumo específico de la gasolina a un volumen de  $25 \text{ cm}^3$ , donde la velocidad angular se la necesita en radianes sobre segundos para posteriormente calcular la potencia generada por el motor de combustión interna, por esta razón se multiplica  $2\pi$  rad para transformar las revoluciones en radianes, porque se sabe que una vuelta ó una revolución es igual a  $2\pi$  rad ó 360 grados, pero como se necesita en radianes se usa la conversión de  $1 \text{ rev} = 2\pi$  rad. Entonces con esta aclaración se procede a calcular el número de revoluciones necesarias para calcular la potencia.

A continuación, se calcula la revolución por segundo promedio del motor en radianes sobre segundo (rad/seg).

$$w = 2\pi \frac{N}{t}$$

$$w = 2\pi \frac{5305.72}{110.75}$$

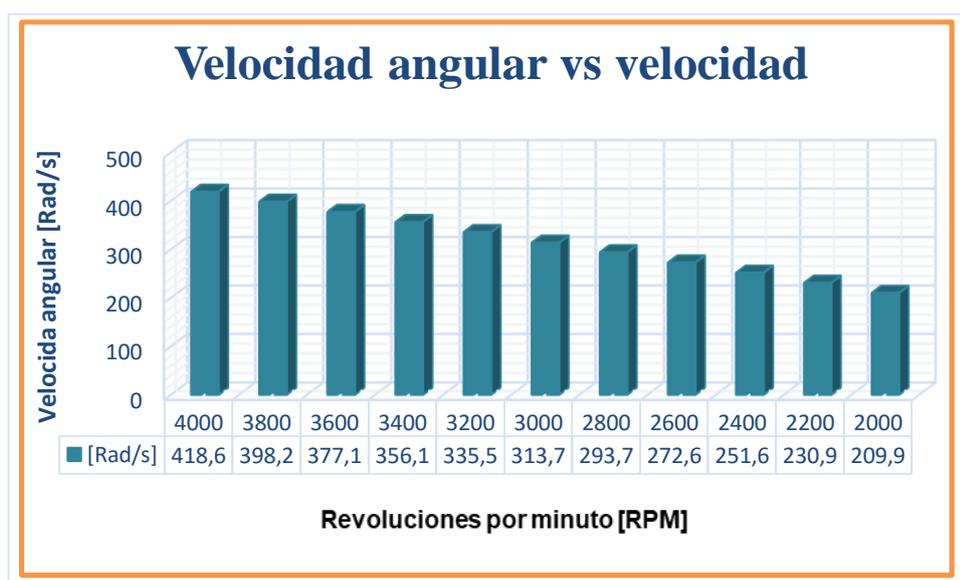
$$w = 301.03$$

De esta manera se calcula todas las velocidades angulares producidas a diferentes velocidades.

**Tabla 26****Datos de la velocidad angular.**

Tiempo de consumo de Combustible (t)	Número de revoluciones (#)	Velocidad angular (w)	Velocidad angular (w)	Velocidad (V)
Segundos	Número Revoluciones	Revoluciones por segundo	Radianes sobre segundo	Revoluciones por minuto
91	6062	66.62	418.59	4000
83.8	5311	63.38	398.23	3800
87.7	5263	60.01	377.05	3600
91.1	5164	56.68	356.13	3400
96.6	5157	53.39	335.46	3200
104.2	5213	49.93	313.72	3000
110.4	5161	46.75	293.74	2800
121.3	5263	43.39	272.63	2600
129.8	5198	40.05	251.64	2400
140.9	5178	36.75	230.91	2200
161.4	5393	33.41	209.92	2000
110.75	5305.72	47.91	301.03	Promedios

Con los datos expresados en la tabla anterior se genera la gráfica correspondiente al comportamiento que tiene la velocidad angular en la salida del motor.

**Figura 67 Velocidad angular ejercida por el motor**

#### 4.5. Cálculo de la potencia

Se puede definir a la potencia físicamente como la cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo, misma fórmula que se puede adecuar a los datos obtenidos para facilitar el cálculo de la potencia en función del torque y de la velocidad angular, misma conversión convergen en el mismo resultado y no alteran las fórmulas ya establecidas. Estas conversiones se detallan más adelante.

Con el dato obtenido del torque se procede a calcular la potencia generada por el motor de combustión interna a gasolina, verificando la curva característica y el comportamiento del motor a varias velocidades. Para este fin se aplica la ecuación de la potencia en función del torque y la velocidad angular.

Para el cálculo de la potencia utilizando esta ecuación cabe recalcar que se necesita el dato del torque en la unidad de Newton por metro (Nm) y la velocidad angular calculada en radianes sobre segundo (rad/seg) para que la potencia nos dé en la unidad de watts (w).

$$P = Tq.w$$

$$P = 3.4503 \times 301.03 \frac{Nm}{seg}$$

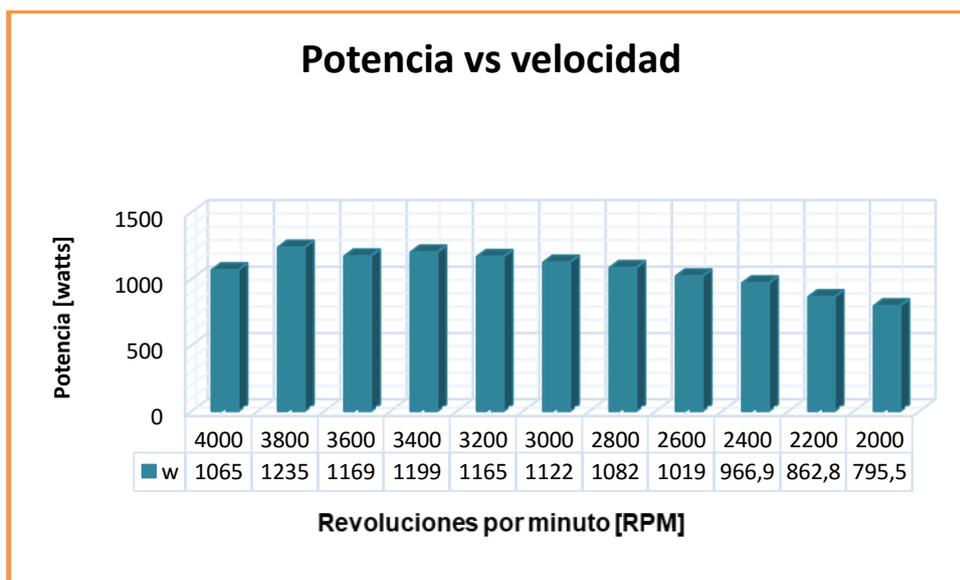
$$P = 1038.644w$$

Con esta fórmula se puede calcular la potencia generada por el motor de combustión interna a diferentes velocidades con un consumo específico referencial de gasolina de 25 cc.

**Tabla 27****Datos de la potencia obtenida.**

Velocidad (V)	Torque (T)	Velocidad angular (w)	Potencia (P)
Revoluciones por minuto	Nm	Rad/seg	Watts
4000	2,544	418,59	1064,893
3800	3,2005	398,23	1234,7121
3600	3,1005	377,05	1169,0435
3400	3,3655	356,13	1198,5555
3200	3,4715	335,46	1164,5494
3000	3,5775	313,72	1122,3333
2800	3,6835	293,74	1081,9913
2600	3,7365	272,63	1018,682
2400	3,8425	251,64	966,9267
2200	3,7365	230,91	862,79522
2000	3,7895	209,92	795,49184
Promedios	3,4503	301,03	1038,6438

De los datos obtenidos en el cálculo de la potencia se genera la siguiente gráfica, observando la curva característica que tiene la potencia a diferentes velocidades.

**Figura 68 Potencia ejercida por el motor**

En el gráfico de la potencia generada por el motor se puede constatar que la potencia máxima (pico máximo) generado es a una velocidad de 3800 revoluciones por minuto con una potencia de 1234,7121w, así también con una potencia mínima (pico mínimo) de 795,49184w a 2000 revoluciones por minuto.

#### **4.6. Pruebas para obtención de la fuerza - hidrógeno**

De la misma forma que se trabajó en la obtención de los datos de la fuerza con el motor de combustión interna alimentado por gasolina se procede a tomar los datos respectivos del banco de pruebas (dinamómetro eléctrico) ahora con alimentación del gas hidrógeno - oxígeno generado por el reactor:

- Tiempo de consumo de combustible
- Volumen de gasolina
- Fuerza torsional generada
- Consumo másico de aire
- Temperatura de gases de escape
- Número de revoluciones

En la utilización del banco de pruebas se debe tener en consideración los siguientes aspectos de importancia:

- Manipular el equipo solo con personal autorizado.
- Revisar previamente que el circuito de encendido del banco de pruebas esté debidamente conectado.
- Calentar el motor por 15 minutos con gasolina antes de utilizar solamente a hidrógeno.
- Revisar de igual manera el sistema de alimentación del hidrógeno hacia el motor de combustión interna, comprobando esencialmente ninguna fuga de hidrógeno al ambiente.

- **IMPORTANTE:** Utilizar elementos de seguridad (Orejas, guantes, gafas)
- Colocar los depósitos de almacenaje de hidrógeno fuera del alcance de los que realizan la práctica.

En las pruebas realizadas con el hidrógeno se tuvo varias explosiones de características diferentes, explosiones pequeñas, medianas y muy grandes, misma que provocaron sorderas por un lapso de 24 horas y desprendimiento de material a gran velocidad, por la misma razón es esencial el uso de las orejas para protección vital de los oídos, además de la protección de los ojos, ya que las explosiones grandes se produjeron en los tanques de almacenaje que al principio fueron hechos por tubo PVC, mismos que no resistieron a la explosión del hidrógeno en su interior y su destrucción hizo que salieran disparadas pequeños fragmentos que pueden dañar al ojo humano.

Con este procedimiento y la recomendación previa se realizó las pruebas pertinentes utilizando gas hidrógeno - oxígeno tomando como datos esenciales los siguientes que se presenta en la tabla 4.10, datos obtenidos del dinamómetro eléctrico con una aceleración constante del motor al 100%:

**Tabla 28**

**Datos obtenidos del dinamómetro utilizando gas hidrógeno - oxígeno.**

Velocidad (V)	Fuerza (F)	Tiempo de consumo de combustible (t)	Consumo másico de aire (h0)	Temperatura de gases de escape (TE)	Número de revoluciones (#)
Revoluciones por minuto	Newton	Segundos	Kg/Hrs	Grados Celsius	Número Revoluciones
2730	6,1	6	5.23	103	45.5
2580	5,5	10	3.33	125	43
2500	6,1	6	5.40	141	41.67
2070	5,1	7	1.74	131	34.5
1950	5,2	8	4.88	117	32.5
1830	9,6	38	3.77	166	30.5
Promedios	6,27	12.5	4.06	130.5	37.95

Para la medición de todos estos parámetros característicos del motor de combustión interna se utilizó solamente hidrógeno y oxígeno por electrolisis.

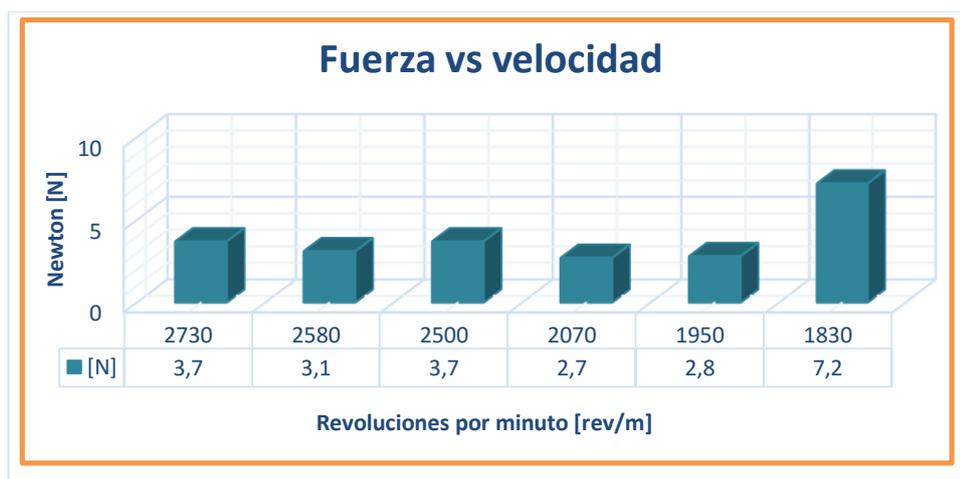
La fuerza generada por el motor de combustión interna al aplicarle carga por medio de un motor eléctrico permite la medición en Newton de la fuerza torsional generada para vencer esta carga y así producir un trabajo. A esta fuerza obtenida del banco de pruebas se le resta 2,4 N porque en el software no marca desde cero, sino que viene con ese margen de error.

**Tabla 29**

**Datos de la velocidad vs fuerza torsional real producida.**

Velocidad (v)	Fuerza (F)	Margen de error (F)	Fuerza Real (F)
Revoluciones por minuto (rev/min)	Newton (N)	Newton (N)	Newton (N)
2730	6,1	2,4	3,7
2580	5,5	2,4	3,1
2500	6,1	2,4	3,7
2070	5,1	2,4	2,7
1950	5,2	2,4	2,8
1830	9,6	2,4	7,2
Promedios	6,27	2,4	3,87

Con estos datos obtenidos se observa el comportamiento del motor a diferentes velocidades y la fuerza que debe ejercer ante una carga. En la siguiente figura se muestra tal comportamiento.

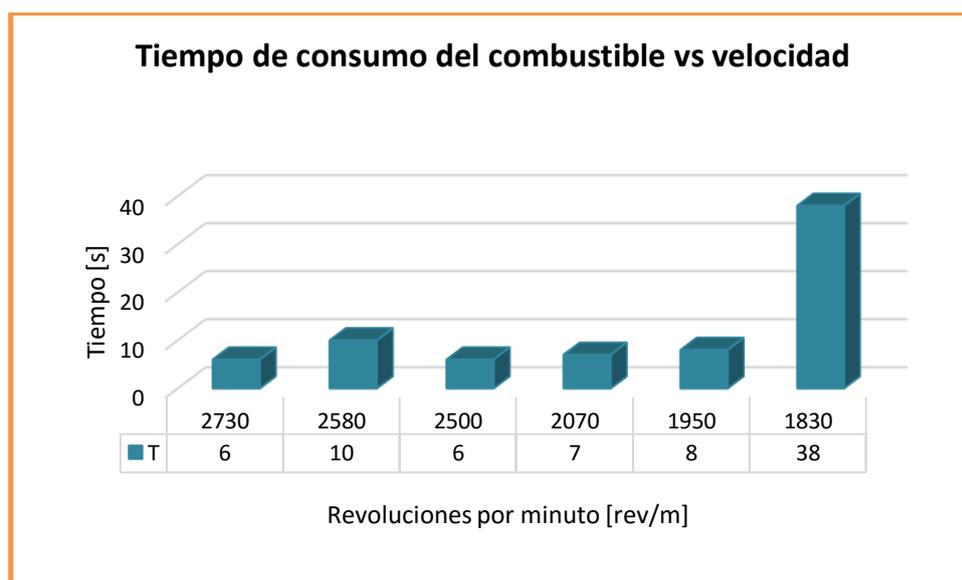


**Figura 69** Fuerza ejercida por el motor vs velocidad

**Tabla 30****Datos de la velocidad vs tiempo del consumo de combustible.**

Velocidad (V)	Tiempo de consumo de combustible (t)
Revoluciones por minuto	Segundos
2730	6
2580	10
2500	6
2070	7
1950	8
1830	38
Promedios	12,5

Se presenta el gráfico de la variación que sufre en el tiempo al combustionar el hidrógeno en el interior del cilindro del motor.

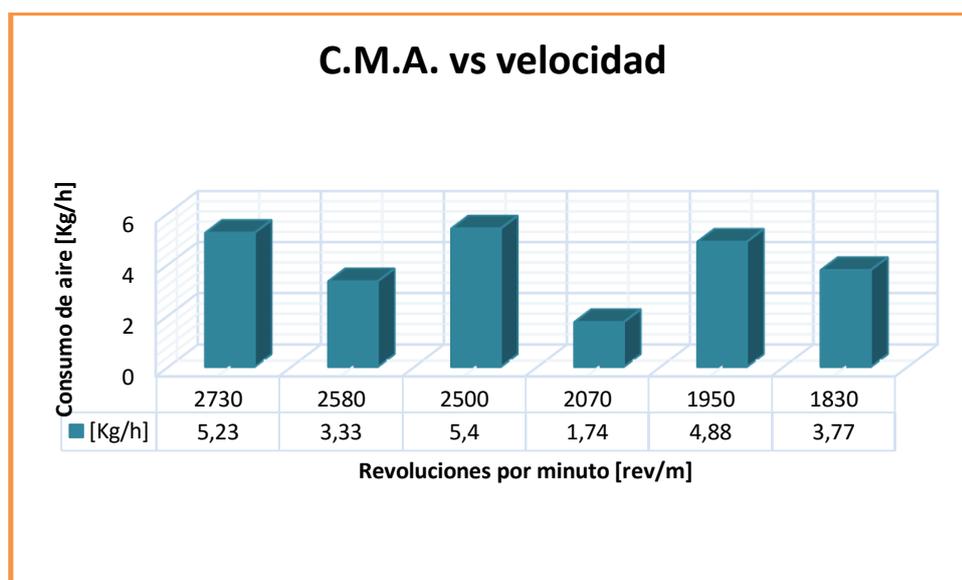
**Figura 70 Tiempo del consumo de combustible vs velocidad**

Mediante un sensor MAF de uso automotriz se logra medir el consumo de aire que necesita el motor para combustionar con la gasolina extra.

**Tabla 31****Datos de la velocidad vs consumo másico de aire.**

Velocidad (V)	Consumo másico de aire (h <sub>0</sub> )
Revoluciones por minuto	Kg/Hrs
2730	5,23
2580	3,33
2500	5,40
2070	1,74
1950	4,88
1830	3,77
Promedios	4,06

De la misma forma se presenta el gráfico del consumo de aire a distintas velocidades, tomando las mediciones en kilogramos por una hora de trabajo del motor.

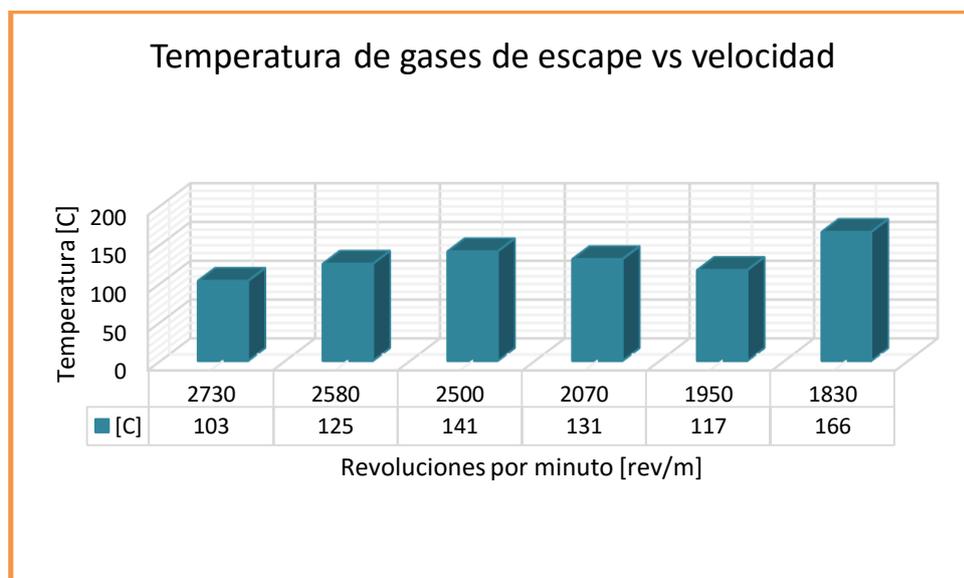
**Figura 71 Consumo másico de aire vs velocidad**

Una medición importante también es saber que temperatura genera la combustión interna del motor, donde se puede ver la pérdida de energía que se produce en forma de calor.

**Tabla 32****Datos de la velocidad vs temperatura de los gases de escape.**

Velocidad (V)	Temperatura de gases de escape (T <sub>E</sub> )
Revoluciones por minuto	Grados Celsius
2730	103
2580	125
2500	141
2070	131
1950	117
1830	166
Promedios	130,5

A continuación, la gráfica de las distintas temperaturas producto de la combustión del aire con el combustible en el interior del cilindro del motor.

**Figura 72 Temperatura de gases de escape vs velocidad.**

En la siguiente tabla se muestra el número de revoluciones por segundo que tarda el motor de combustión interna en consumir el hidrógeno del tanque de almacenamiento.

**Tabla 33****Datos de la velocidad vs número de revoluciones.**

Velocidad (V)	Número de revoluciones (#)
Revoluciones por minuto	Número Revoluciones
2730	45,5
2580	43
2500	41,67
2070	34,5
1950	32,5
1830	30,5
Promedios	37,95

La medición de las revoluciones por segundo que se produce en consumir el hidrógeno permitirá calcular la relación aire combustible más adelante.

**Figura 73** Número de revoluciones vs velocidad.

#### 4.7. Cálculo del torque con hidrógeno

Con los datos obtenidos de la fuerza generada por el motor de combustión interna al aplicarle una carga por medio de un motor eléctrico permite la medición en Newton de la fuerza torsional generada para vencer esta carga y así producir un trabajo con el banco de pruebas y mediante fórmulas ya preestablecidas se calculará:

- Torque (T)
- Potencia (P)
- Relación aire – combustible (A/C)

En el capítulo II se muestra la ecuación para el cálculo respectivo del torque, la misma que se utilizará para ver el comportamiento del motor a diferentes velocidades con un continuo suministro de gasolina de 250 cc.

Para el cálculo del torque con la presencia de hidrógeno obtenido de la electrolisis del agua se procede de la misma manera utilizando las mismas fórmulas que con la gasolina.

$$T = \frac{(3,87N) * (265mm) * (1m)}{1000 \text{ mm}}$$

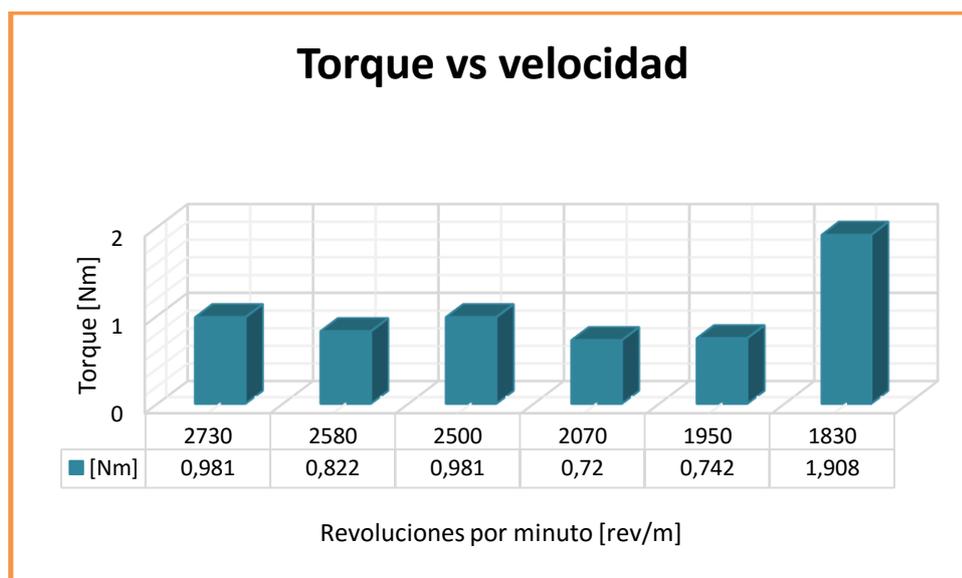
$$T = 1,026 \text{ Nm}$$

**Tabla 34**

**Datos del torque generado a diferente velocidad.**

Velocidad (v)	Fuerza Real (F)	Torque (T)
Revoluciones por minuto (rev/min)	Newton (N)	Nm
2730	3,7	0,981
2580	3,1	0,822
2500	3,7	0,981
2070	2,7	0,720
1950	2,8	0,742
1830	7,2	1,908
Promedios	3,87	1,026

A continuación, se presenta el gráfico de los diferentes torques que se fue generando mientras se reducía la velocidad en un rango de 2000 revoluciones por minuto aplicando una carga torsional por medio de un motor eléctrico con resistencias.



**Figura 74 Torque ejercido por el motor en función de la velocidad**

#### 4.8. Cálculo de la potencia con hidrógeno

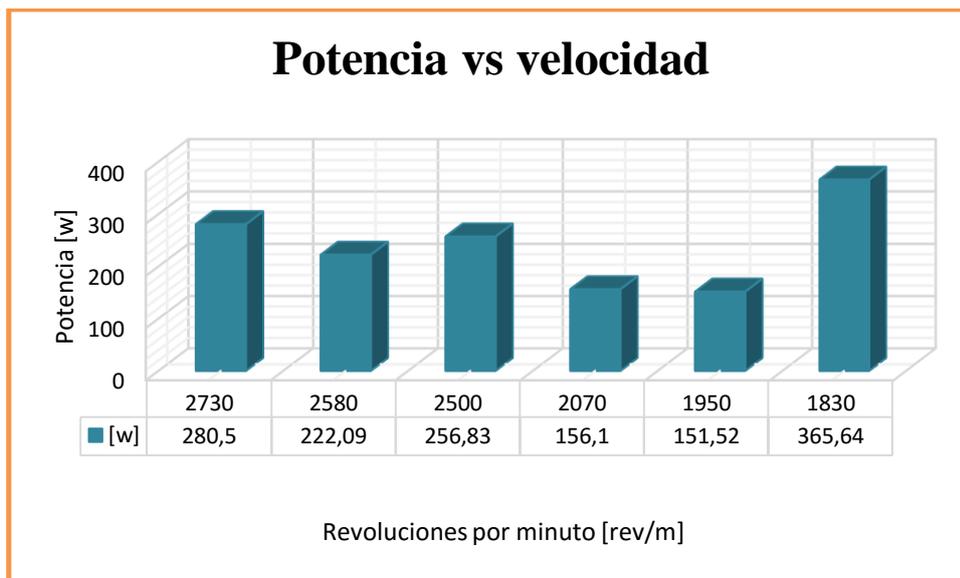
Con el dato obtenido del torque se procede a calcular la potencia generada por el motor de combustión interna a gasolina, verificando la curva característica y el comportamiento del motor a varias velocidades. Para este fin se aplica la ecuación 2.28 del capítulo II de la potencia en función del torque y la velocidad angular.

**Tabla 35**

**Datos de la velocidad angular.**

Velocidad (v)	Torque (T)	Potencia (P)
Revoluciones por minuto (rev/min)	Newton por metro (Nm)	watts(w)
2730	0,981	280,50
2580	0,822	222,09
2500	0,981	256,83
2070	0,720	156,10
1950	0,742	151,52
1830	1,908	365,64
Promedios	2276,67	244,61

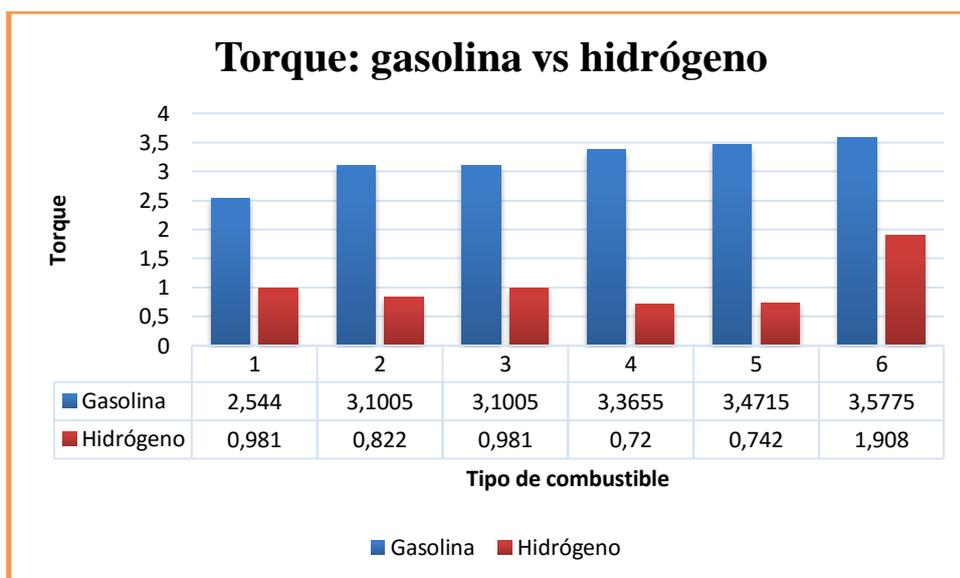
De los datos obtenidos en el cálculo de la potencia se genera la siguiente gráfica, observando la curva característica que tiene la potencia a diferentes velocidades utilizando el hidrógeno obtenido de la electrólisis del agua.



**Figura 75** Potencia ejercida por el motor

#### 4.9. Comparación del torque generado por la gasolina vs hidrógeno

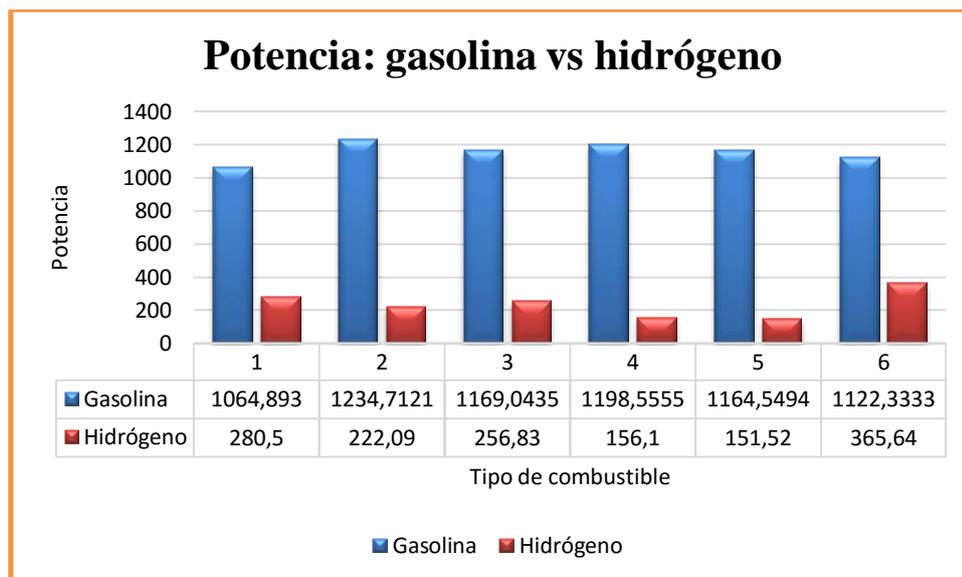
Se verificó que el torque generado por la gasolina en el motor de combustión interna es en promedio de 3,45 Nm y en comparación con el hidrógeno que en promedio tiene 1,03, la diferencia es evidente con un de torque perdido de aproximadamente 2,42 Nm que corresponde al 70,15% de pérdida total.



**Figura 76** Torque: Gasolina vs hidrógeno

#### 4.10. Comparación de la potencia generada por la gasolina vs hidrógeno

Además, se verificó que la potencia generada por la gasolina en el motor de combustión interna es en promedio de 1038,64 watts y en comparación con el hidrógeno que en promedio tiene 244,61 watts de potencia, la diferencia es evidente con una potencia perdida de aproximadamente 794,03 watts que corresponde al 76,45% de pérdida total.



**Figura 77 Potencia: Gasolina vs hidrógeno**

#### 4.11. Pruebas con el analizador de gases QGA-1000

Para el análisis de gases de las emisiones resultantes de la combustión de la gasolina en el motor de combustión interna se utilizó el analizador QGA-1000 del laboratorio de revisión vehicular en Quito, Turbo Diagnostic. Mismo que dio resultados positivos al comparar el uso habitual de la gasolina con el hidrógeno obtenido del reactor.

Los datos que se obtuvo marcan aumentos y disminución en ciertos parámetros característicos que hoy en día son revisados en varias ciudades del país, como prioridad para la movilización del parque automotor dentro de la ciudad.

4 Gas Emission Analyzer	4 Gas Emission Analyzer
2018/02/20 PM 2:35 CAR NUMBER: 0000 CO : 0.15 % HC : 888 ppm CO2 : 6.8 % O2 : 8.82 % LAMBDA: 1.726 AFR : 25.3 FUEL : GASOLINE H/C : 1.8500 O/C : 0.0000	2018/02/20 PM 3:35 CAR NUMBER: 0000 CO : 0.12 % HC : 1084 ppm CO2 : 7.3 % O2 : 5.84 % LAMBDA: 1.407 AFR : 20.6 FUEL : GASOLINE H/C : 1.8500 O/C : 0.0000

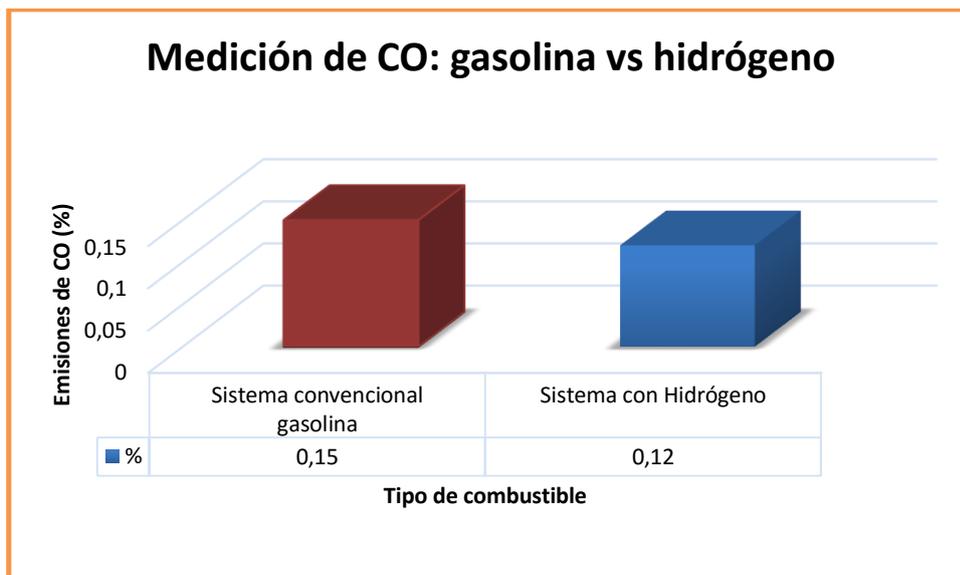
**Figura 78 Resultados de la prueba de análisis de gases de escape**

**Tabla 36**

**Datos del análisis de gases de escape**

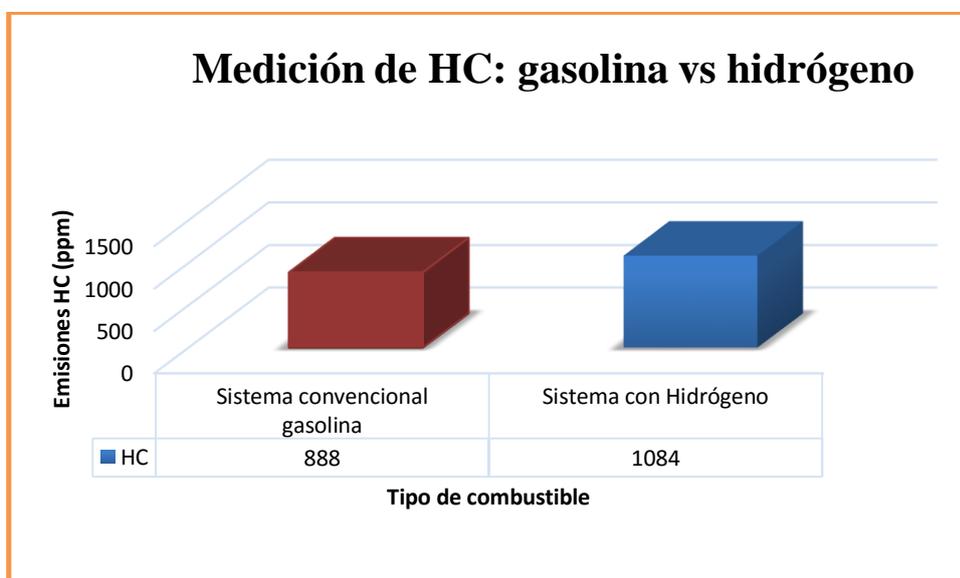
GAS	Unidad	Sistema convencional gasolina	Sistema con Hidrógeno	Porcentaje de variación	Característica
CO	%	0,15	0,12	20,51%	Disminuye
HC	Ppm	888	1084	22,07%	Aumenta
CO <sub>2</sub>	%	6,8	7,3	7,35%	Aumenta
O <sub>2</sub>	%	8,82	5,84	33,79%	Disminuye
Lambda	$\lambda$	1,726	1,407	18,48	Disminuye

Con los resultados obtenidos en el analizador de gases QGA-1000 se realizó un breve análisis para cada uno de los gases en función al porcentaje de variación entre la gasolina y el hidrógeno.



**Figura 79 Medición del CO**

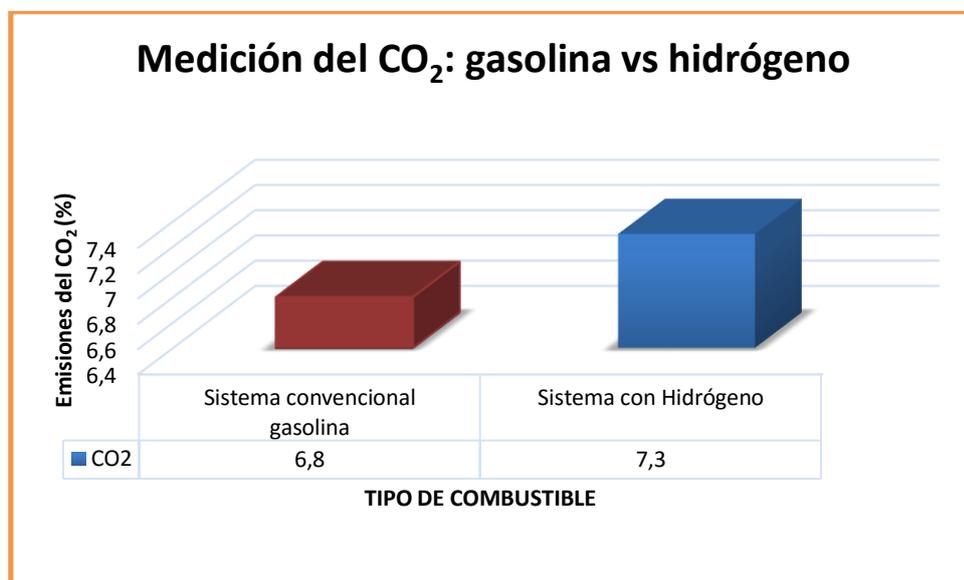
Las emisiones de CO, en las pruebas realizadas son de 0,15% con el sistema convencional a gasolina y de 0,12% con el sistema a hidrógeno, produciéndose una variación de 20,51%. El porcentaje de monóxido de carbono es mayor utilizando gasolina como combustible, lo cual indica que existe una combustión incompleta.



**Figura 80 Medición del HC**

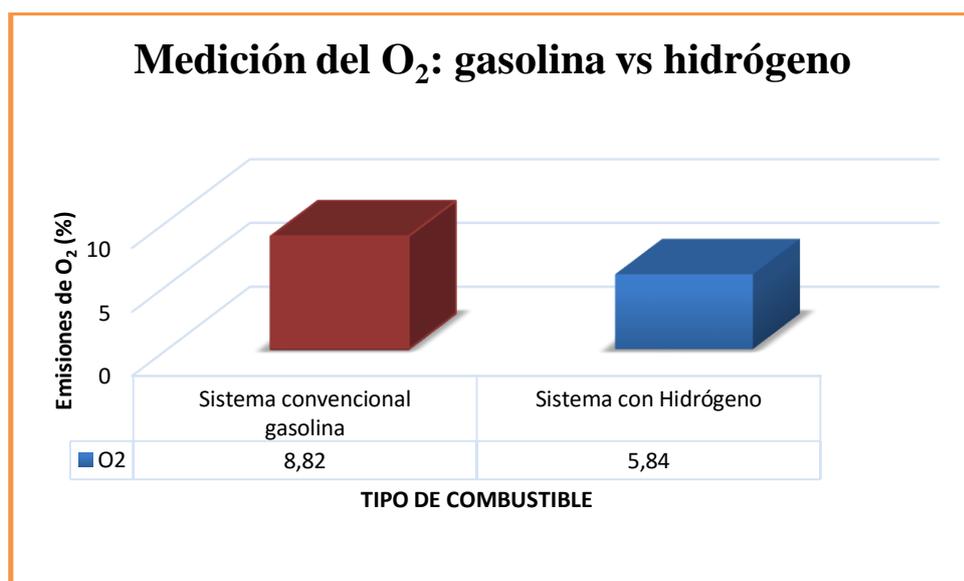
En cuanto se refiere a los hidrocarburos no combustionados, existe un aumento de partículas por millón. El sistema convencional a gasolina genera 888 ppm de HC, a

diferencia del sistema hidrógeno que produce 1084 ppm de HC, obteniéndose un aumento del 22,07%.



**Figura 81** Medición del CO<sub>2</sub>

En el caso del CO<sub>2</sub>, con el sistema a gasolina el valor es de 6,8% mientras que con el sistema a hidrógeno el valor es de 7,3%, con una variación de 7,35%, esto beneficiando al proceso de combustión, mientras más alto sea las emisiones de CO<sub>2</sub>.



**Figura 82** Medición del O<sub>2</sub>

El contenido de  $O_2$  con gasolina es de 8,82% y con hidrógeno es de 5,84%, produciéndose una variación de 33,79%, lo cual demuestra que la lectura con gasolina es una mezcla pobre y con hidrógeno es una mezcla rica, mejora la combustión con hidrógeno.

## CAPÍTULO V

### MARCO ADMINISTRATIVO

Se presentan los costos de elaboración de los reactores de hidrógeno, para el respectivo análisis de factibilidad de realizar la electrolisis del agua y utilizar el hidrógeno producido como combustible alternativo en el motor de combustión interna a gasolina de una motocicleta: el costo de los electrodos utilizados, el electrolito, los costos de generación de hidrógeno en cada uno de los reactores respectivamente, a través de la investigación se determinó conclusiones y recomendaciones que permitan conocer la viabilidad y así realizar nuevas investigaciones con respecto a combustibles alternativos que ayuden a reutilizar elementos existentes en el planeta y cuidar de su hábitat.

#### 5.1. Factibilidad de la investigación

Los recursos materiales, tecnológicos y humanos e incluso los institucionales son primordiales para la realización del proyecto de tesis, siendo en un futuro un aporte que será utilizado diariamente en beneficio del medio ambiente. De tal forma es necesario, preparar el presupuesto tomando en cuenta estos parámetros.

##### 5.1.1. Recursos humanos.

Son las personas que aportaron con sus conocimientos para realizar los experimentos, fundamento matemático y estructura de los reactores en la presente investigación.

**Tabla 37**

Recursos humanos

Orden	Descripción	Cargo	Función
1	Edwin Telenchana	Estudiante	Investigador
2	Ing. Germán Erazo	Docente tiempo completo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga	Tutor, Investigador y asesor del proyecto

CONTINÚA



3	Ing. Alberto Naranjo	Laboratorista de motores de combustión interna de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE	Colaborador científico (Pruebas en el motor)
---	----------------------	--	--

---

### 5.1.2. Recursos materiales

Los recursos materiales son los elementos que se utilizaron para realizar el proyecto de investigación.

**Tabla 38**

#### Recursos materiales

Orden	Ítems
1	Sosa cáustica
2	Agua destilada
3	Gasolina comercial
4	Batería de 12 voltios
5	Motocicleta de paseo
6	Acero inoxidable quirúrgico
7	Depósitos plásticos Rotoplas

### 5.1.3. Recursos tecnológicos.

Los recursos tecnológicos son los equipos que se utilizó para realizar el proyecto de investigación.

**Tabla 39**

#### Recursos tecnológicos

Orden	Ítems
1	Computador portátil
2	Scanner
3	Impresora
4	Voltímetro
5	Amperímetro
6	Software de Diseño estructural

El uso de Recursos tecnológicos ayuda al óptimo diseño estructural del reactor, donde se pueden realizar mediciones exactas con el fin de optimizar el desempeño del reactor en pruebas reales.

#### 5.1.4. Recursos institucionales.

Es importante contar con la infraestructura de la universidad, con sus laboratorios al uso constante de los estudiantes, dando el apoyo incondicional de todo su campus politécnico, así como también al personal para que el proyecto de titulación se lo realice de excelente manera.

**Tabla 40**

#### **Recurso institucional**

Campus Politécnico	
Institución	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga
Dirección	Ecuador – Cotopaxi – Latacunga Calle Quijano y Ordoñez y Hermanas Páez
Teléfono	593(3)2810-206 / 2813-130 / 2810-326

#### 5.2. Costo de construcción e instalación del generador de hidrógeno

El diseño y la construcción del reactor para obtener hidrógeno y luego utilizarlo como combustible alternativo en un motor de combustión interna tuvo costos especiales debido a los elementos y componentes que se utilizaron para llevar a cabo con el proyecto de titulación, mismos elementos que no pueden ser sustituidos por otros por no brindar las mismas características necesarias para que la descomposición del agua se dé de correcta manera dentro de los reactores.

Se debe evitar que los electrodos de cada uno de los reactores no se vean afectados por el flujo de electrones de hierro, porque estos dañan la superficie de contacto con el electrolito y perjudica la descomposición correcta que debe generarse en cada reactor. Por esto, se deben trabajar en su totalidad con el material de acero inoxidable, tanto en placas como en pernos para que los reactores tengan una larga vida útil y sirvan como generadores de energía.

### 5.2.1. Costos del reactor de hidrógeno.

**Tabla 41**

#### Costos del reactor de hidrógeno

	Equipos	Costos
1	Motocicleta de paseo Ranger de 110 cm <sup>3</sup>	1200
2	Acero inoxidable quirúrgico	250
3	Acoples de los electrodos y tanque de almacenaje de hidrógeno	500
4	Batería de 12 voltios, electrolito cañerías y demás	150
5	Estructura del reactor	100
	TOTAL	2200

### 5.2.2. Costo del motor de combustión interna a gasolina.

El reactor de hidrógeno diseñado y construido para hacer funcionar un motor de combustión interna en lugar de la gasolina, puede oscilar su cilindrada entre los 50 cc hasta los 175 cc, por esta razón se adquiere una moto con un cilindraje de 110 cc, para que esta sea la encargada de llevar a feliz término este proyecto de titulación.

El motor de la motocicleta es de dos tiempos, mismo que es más ligero y rentable en comparación a los motores de 4 tiempos, donde el cilindro admite la gasolina y se mezcla en el cárter donde se produce el cambio de gases, como se utiliza el mismo cárter para el aceite y la gasolina, el aceite también entra a combustionar en el momento del trabajo del pistón.

**Tabla 42**

#### Costos del motor a gasolina

	Equipos	Costos
1	Motocicleta de paseo Ranger de 110 cm <sup>3</sup>	1200
	TOTAL	1200

### 5.2.3. Costos de las pruebas.

#### Tabla

#### Costos del reactor de hidrógeno

	Equipos	Costos
1	Pruebas de fuerza, torque y potencia del motor	200
2	Pruebas de análisis de gases de escape	100
3	Pruebas de funcionamiento del motor de combustión interna	100
4	Pruebas de funcionamiento del circuito eléctrico del reactor	100
5	Pruebas de las mezclas del gas hidrógeno oxígeno	100
	TOTAL	600

### 5.3. Fuentes de financiamiento

Para la puesta en marcha del proyecto es necesaria una inversión total de 2800,00 dólares americanos por lo que la opción de un préstamo bancario es necesaria para la adquisición de todos los elementos y equipo que se requiere, así como para cubrir los gastos de las pruebas y demás gastos que se requieren en el proyecto de titulación.

## CONCLUSIONES

Se detalla las conclusiones que generó el proyecto de investigación, así como las recomendaciones que permitan seguir con investigaciones en combustibles alternativos con la finalidad de buscar nuevas fuentes de energías renovables.

- Se construye y se diseña un reactor de hidrógeno – oxígeno utilizando el mismo gas para hacer funcionar el motor de combustión interna en reemplazo de gasolina extra de 87 octanos comercial.
- Se investigó en fuentes bibliográficas confiables, con respecto al material de las placas a utilizar y el mejor electrolito que permita el intercambio eficiente de electrones y se obtenga mayor hidrógeno.
- Se selecciona placas de acero inoxidable quirúrgicas para los electrodos, mismos que generan hidrógeno en un medio líquido compuesto por sosa cáustica diluida en agua destilada, con una corriente continua de 12 voltios.
- El gas hidrógeno – oxígeno producido hace funcionar al motor de combustión interna en reemplazo de la gasolina y de la misma manera en un sistema híbrido gas HHO – gasolina se verifica que para el correcto funcionamiento se debe trabajar con dos placas neutras generando un gas no explosivo.
- Se determinó el número de placas que permitan descomponer el agua destilada en proporciones exactas para hacer funcionar el motor de combustión interna a gasolina.
- Se comparó el torque y potencia generado por el motor de combustión interna con gasolina y solamente a hidrógeno obtenido de la descomposición del agua.
- Se adaptó el ingreso de hidrógeno producido en la entrada de aire del motor de combustión interna, entre el filtro de aire y el carburador, determinando el potencial energético del hidrógeno, parámetros mecánicos y térmicos en el motor de combustión interna a gasolina.
- Se verificó un aumento del CO<sub>2</sub> en un 0,5%, aumento de hidrocarburos (HC) de 196 ppm, una disminución de O<sub>2</sub> en un 2,98% y finalmente una reducción del CO de 0,03%.

## RECOMENDACIONES

- Se debe indagar información actualizada y verificar su veracidad pertinente para empezar la investigación.
- Calibrar los equipos antes de iniciar la medición para obtener valores confiables en cada una de las pruebas a realizar.
- Utilizar equipos de seguridad industrial para las prácticas en el banco de pruebas como: gafas plásticas, orejeras, guantes de electricista y el mandil, ya que el hidrógeno es muy volátil y se comprobó explosiones de magnitud media que pueden causar lesiones al cuerpo humano.
- Dar mantenimiento a los electrodos luego de ser utilizado el reactor.
- Utilizar un sistema de refrigeración a los cables y bornes de los electrodos, ya que se recalientan demasiado por el flujo de electrones en el interior de los reactores.
- No utilizar material que contenga hierro (Fe) o recubrimiento galvanizado ya que dañan las placas y acortan la vida útil de los electrodos.
- Utilizar pernos, tuercas y placas totalmente compuestos de acero inoxidable para que la descomposición sea eficiente y efectiva.
- Desarrollar proyectos de investigación que promuevan el cuidado del medio ambiente, basándose en la utilización de energías renovables de fácil producción.
- Fabricar obligatoriamente un filtro de hidrógeno-arresta llamas que no permita el paso de alguna chispa al sistema y proteja la explosión de los reactores.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre G, O. A. (2013). *Celdas de hidrógeno y su potencial de aplicación*.
- Altamirano, B., & Pabón, Q. (2016). Obtención de la mezcla combustible diésel con aceites lubricantes reciclados del automóvil en concentración de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% y determinación de los parámetros característicos del motor. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.
- Botas, J., Calles, J., Dufour, J., & San Miguel, G. (2005). Producción y almacenamiento de hidrógeno. *Asociación Española de Científicos*.
- Castell, E. X. (2012). *El hidrógeno y las pilas de combustibles*. Berlín: Días de Santos.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). *Termodinámica, 6ta edición*. México, D.F.: Mc Graw-Hill.
- Colectivo de autores. (2012). Industria terminal automotriz. B. *ProMéxico*, 32.
- Creus, A. (May de 2009). *Energías renovables*. Barcelona: Cano Pina.
- Franco, J. I., Fasoli, H. J., Sanguinetti, A. R., & Lavoyarte, M. J. (2010). TECNOLOGÍA ARGENTINA EN LA INGENIERÍA DE PILAS DE COMBUSTIÓN A HIDRÓGENO CON ELECTROLITO POLIMÉRICO.
- Gayoso, M. (1991). *Resolución de problemas de Química general*. Barcelona: Reverté S.A.
- Gómez, S., & Vega, S. (2015). Automatización del banco de pruebas plint TE-46 del laboratorio de motores de combustión interna del DECEM. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Hurtado, J. I., & Soria, B. Y. (2007). El hidrógeno y la energía. *Asociación Nacional de Ingenieros de la ICAI*.
- Jaramillo, J. (2004). *Química. Prueba Específica. Prueba de acceso a la Universidad para mayores de 25 años*. Sevilla: MAD S.L.
- Kuan-Yun, K. (1986). Kuo. Principles of Combustion. *Interscience Publication*.
- Llorca, J. (2010). *El hidrógeno y nuestro futuro energético*. Barcelona: UPC.
- Lopez, L. (2014). Estudio de la viabilidad socio-ambiental del hidrógeno como vector energético producido a partir de energías renovables en el Ecuador. *Doctoral dissertation EPN*. Quito.

- Montes , M. J., Abádanos , A., & Martinez-Val, J. M. (2010). *Produccion de Hidrógeno a partir de energía solar*. Recuperado el 23 de Octubre de 2017, de <http://energias sostenibles.net>
- Morales S, N. (2007). Antecedentes. Necesidades de fuentes de energía alternativas . En Obtención de hidrógeno mediante reformado catalítico de nafta con vapor de agua. ((16,17,18)).
- Perez Gisbert, A. (2010). *Ingeniería del medioambiente*. Madrid: ECU.
- Posso, F. (2007). Desarrollo en Venezuela de un sistema energético basado en el hidrógeno. I: Producción de hidrógeno electrolítico. *Revista técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Zulia*, 201-208.
- Prades, C. A. (2006). *Hidrógeno hoy: una alternativa energética y ambiental*. Buenos Aires: Cathedra Jurídica.
- Reyes G, C., & Andrade, J. L. (2007). Los isótopos estables del hidrógeno y el oxígeno en los estudios ecofisiológicos de plantas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 19-28.
- Romero, P., & Pitre, M. (2014). *Simulación computacional de las metodologías Mitzlaff y Agudelo Mejía para la selección de un dispositivo de mezclado de aire hidrogeno para motores de combustión interna de bajo costo*.
- Sanchez, N. M., & Faus, F. V. (2007). Obtención de hidrógeno mediante reformado catalítico de nafta con vapor de agua. *Doctoral dissertation*.
- Simes, L. E. (2011). *Introducción a la química general*. Buenos Aires: Universitas.
- Sullivan, M. (2006). *Algebra y Trigonometría*. México: Prentice Hall.
- Yuma Yar, D. A., & Martinez, A. H. (2015). Diseño e instalación de un sistema de alimentación gasolina-HHO en el motor de combustión interna del vehículo monoplaaza tipo Buggy del Laboratorio de Mecánica de Patio de la ESPE extensión Latacunga. *Energía y Mecánica, Inovación y Tecnología*.

## **ANEXOS**



**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Edwin Fabricio Telenchana Cuspa. Bajo nuestra supervisión.

**Aprobado por:**

Ing. Germán Erazo

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

Ing. Danilo Zambrano

**DIRECTOR DE LA CARRERA**

Dr. Freddy Jaramillo

**SECRETARIO ACADÉMICO**

