



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**IMPLEMENTACIÓN EN UN VEHÍCULO CON MOTOR OTTO DE  
UN SISTEMA MIXTO DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE  
NAFTA – HIDRÓGENO.**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de ingeniero mecánico  
automotriz.**

**Autores**

Pablo Fernando Yuquilima Campoverde  
Guillermo Eduardo Vintimilla Calderón

**Director**

Thelmo Fernando Guerrero Palacios

**Cuenca - Ecuador**

**2012**

## DEDICATORIA

Dedicado a Dios por ser el centro de mi vida y darme la fortaleza para cada día. A mis padres y hermanos por estar siempre en los buenos y malos momentos enseñándome el poder que tiene una familia, todas sus palabras me demostraron el apoyo incondicional, siendo un pilar fundamental para culminar los proyectos de mi formación, confiando en seguir siempre en adelante alcanzando nuevas metas.

Pablo Yuquilima.

A Dios Elohim, por colmarme de bendiciones, por darme la fuerza espiritual necesaria para salir adelante en las adversidades y por haber permitido que se abran mis ojos y oídos espirituales para conocer la verdad. A mis padres, por su apoyo incondicional y por fomentar en mí deseos de superación. A mi enamorada María Fernanda, por creer en mí, por sus valores y por ser la compañera ideal. A mis familiares y amigos, por su aprecio y estima. A mis maestros, por haber contribuido significativamente en mi formación académica y a todas las personas que contribuyeron de alguna manera en la realización de este trabajo

Guillermo Vintimilla.

## AGRADECIMIENTO

A la Universidad del Azuay, a nuestros profesores de la Escuela de Ing. Mecánica Automotriz que compartieron sus conocimientos, a nuestro director de tesis Ing. Fernando Guerrero, por encaminarnos a la culminación de este proyecto, a los compañeros y amigos que formaron parte de nuestra vida estudiantil universitaria.

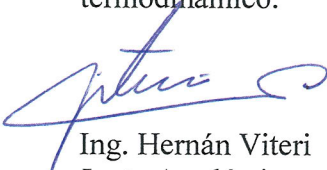
*Handwritten signature and date: 21/11/12*

## RESUMEN

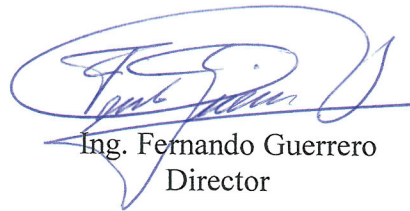
### IMPLEMENTACION EN UN VEHÍCULO CON MOTOR OTTO DE UN SISTEMA MIXTO DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE NAFTA – HIDRÓGENO.

El trabajo inicio con un estudio termodinámico del hidrógeno gaseoso aplicado como combustible complementario en un motor ciclo Otto. El estudio incluyó la modificación del sistema de alimentación para mejorar las prestaciones del motor como: potencia, trabajo, energía y rendimiento conseguidas con el aporte del hidrógeno. Se utilizó el método de la electrólisis del agua para la obtención de este gas debido a que no se requiere de grandes cantidades de energía; es un proceso limpio y utiliza agua como materia prima. Una vez que se concluyeron los estudios, se procedió a la construcción del generador de hidrógeno y sus elementos auxiliares, considerando siempre aspectos técnicos y de seguridad. Como resultado, se determinó que la aceleración, velocidad máxima alcanzada y durabilidad de los componentes no cambiaron; sin embargo, se consiguió una importante reducción en el nivel de emisiones contaminantes y se logró también disminuir el consumo de nafta.

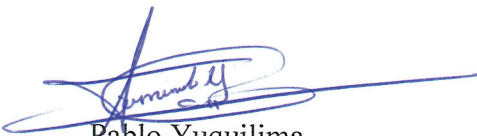
**Palabras claves:** combustibles fósiles, hidrógeno gaseoso, nafta, electrólisis, estudio termodinámico.



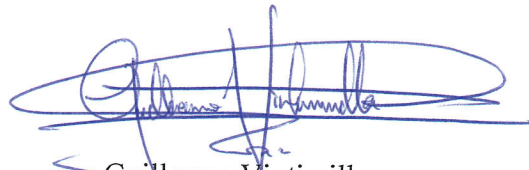
Ing. Hernán Viteri  
Junta Académica



Ing. Fernando Guerrero  
Director



Pablo Yuquilima  
Estudiante



Guillermo Vintimilla  
Estudiante

*Handwritten signature and date*  
2/11/12

## ABSTRACT

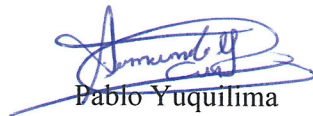
### IMPLEMENTATION OF NAPHTHA – HYDROGEN COMBINED FUEL SUPPLY SYSTEM IN A VEHICLE WITH OTTO ENGINE

The present graduation work consisted of a thermodynamic study of hydrogen gas applied as a complementary fuel in an Otto engine. The study included the modification of the fuel supply system in order to improve the engine's overall performance such as: power, work, energy, and operation, achieved with the contribution of hydrogen. The electrolysis method was employed in order to obtain this gas since it does not require a great amount of energy; it is a clean process that uses water as prime matter. Once the studies concluded, we proceeded to construct the hydrogen generator and its auxiliary elements taking into account safety and technical aspects. As a result we determined that acceleration, maximum velocity, and durability of the components were not significantly affected; however, we were able to achieve an important reduction of the levels of pollution as well as a decrease in the levels of naphtha consumption.


**Key Words:** fuel fossils, hydrogen gas, naphtha, electrolysis, thermodynamic study.



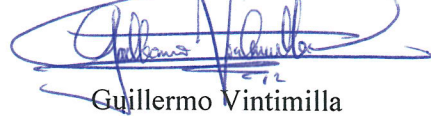
Ing. Hernán Viteri C.  
ACADEMIC BOARD




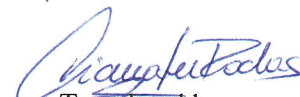
Pablo Yuquilima  
STUDENT



Ing. Fernando Guerrero.  
DIRECTOR



Guillermo Vintimilla  
STUDENT

  
  
UNIVERSIDAD DEL  
AZUAY  
DPTO. IDIOMAS  
Translated by,  
Diana Lee Rodas

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria.....	II
Agradecimiento.....	III
Resumen.....	IV
Abstract.....	V
Indice de contenidos.....	VI
Indice de tablas.....	XI
Indice de figuras.....	XIII
Indice de Anexos.....	XV
Introducción.....	1

### CAPITULO I: ESTUDIO DEL HIDRÓGENO

1.1 Generalidades.....	3
1.1.1 Introducción al hidrógeno.....	3
1.1.2 Isótopos del hidrógeno.....	4
1.1.3 Propiedades.....	5
1.1.3.1 Propiedades químicas.....	5
1.1.3.2 Propiedades físicas.....	5
1.1.3.3 Otras propiedades.....	6
1.1.3.3.1 Poderes caloríficos superior e inferior.....	6
1.1.3.3.2 Inflamabilidad.....	6
1.1.3.3.3 Temperatura de autoignición.....	8
1.1.3.3.4 Energía mínima de la chispa para la ignición.....	8
1.1.3.3.5 Número de octano.....	9
1.1.3.3.6 Detonación.....	9
1.1.3.3.7 Transición de la detonación a la deflagración.....	10
1.2 Formas de obtención del hidrógeno.....	10
1.2.1 Electrólisis.....	10
1.2.1.1 Definición y características principales de la electrólisis....	11
1.2.1.2 Leyes de Faraday de la electrólisis.....	11
1.2.1.3 Conductividad de los electrolitos.....	13
1.2.1.4 Consumo de energía durante la electrólisis.....	13

1.2.1.5	Electrólisis a baja temperatura.....	14
1.2.1.6	Electrólisis de alta temperatura.....	15
1.3	El hidrógeno como fuente de energía alternativa.....	15
1.3.1	El hidrógeno, la fuente de energía alternativa del siglo XXI.....	16
1.4	Importancia de la utilización del hidrógeno como fuente de energía motriz....	17
1.4.1	Funcionamiento de un motor de hidrógeno.....	18
1.4.2	Aspectos técnicos de los motores a nafta e hidrógeno.....	18
1.4.2.1	Ignición.....	18
1.4.2.2	Carburación.....	18
1.5	Almacenamiento, manejo y precauciones durante la manipulación del hidrógeno.....	19
1.5.1	Almacenamiento de hidrógeno.....	19
1.5.2	Precauciones generales.....	20
1.5.3	Fugas.....	20
1.5.4	Toxicidad.....	21

## **CAPITULO II: ESTUDIO TERMODINÁMICO DEL HIDRÓGENO**

2.1	Comparación de aportes energéticos de la nafta – hidrógeno.....	22
2.2	Cálculos de presiones y temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión.....	24
2.2.1	Observaciones para el cálculo termodinámico del ciclo Otto.....	24
2.2.2	Datos para el cálculo del ciclo termodinámico Otto.....	25
2.2.3	Descripción de términos utilizados para los cálculos.....	25
2.2.4	Cálculos para el combustible nafta.....	26
2.2.5	Cálculos para el combustible hidrógeno.....	27
2.2.6	Cálculos para el sistema mixto.....	28
2.2.7	Cálculo de los puntos del ciclo termodinámico Otto.....	28
2.3	Diagramas de trabajo teórico, práctico. (Procesos adiabáticos, entropías entalpías).....	32
2.3.1	Diagramas de trabajo teórico, práctico.....	32
2.3.1.1	Pérdidas de calor.....	33
2.3.1.2	Combustión no instantánea.....	33
2.3.1.3	Tiempo de apertura de la válvula de escape.....	34

2.3.1.4 Aumento de los calores específicos del fluido con la temperatura.....	34
2.3.1.5 Disociación en la combustión.....	35
2.3.2 Procesos adiabáticos.....	35
2.3.3 Entropías.....	37
2.3.4 Entalpías.....	37
2.4 Modificación de los diagramas ocasionado por la presencia de hidrógeno.....	38
2.5 Estudio de la relación estequiométrica óptima empleando nafta e hidrógeno...	42
2.5.1 Empleando nafta.....	43
2.5.2 Empleando hidrógeno.....	43
2.5.3 Empleando un combustible mixto.....	44
2.6 Demostración matemática de la factibilidad del proyecto (trabajo, potencia, energía, rendimiento térmico, rendimiento mecánico, eficiencia).....	45
2.6.1 Trabajo.....	45
2.6.2 Potencia.....	46
2.6.3 Energía.....	47
2.6.4 Rendimiento térmico.....	48
2.6.5 Rendimiento mecánico.....	50
2.6.6 Eficiencia del ciclo.....	50

### **CAPITULO III: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA INSTALACION DEL SISTEMA DE HIDROGENO**

3.1 Esquema del circuito de alimentación de hidrógeno.....	52
3.2 Diseño y construcción de los elementos constitutivos.....	53
3.2.1 Generador de hidrógeno electrolítico.....	53
3.2.1.1 Constitución del generador.....	53
3.2.1.1.1 Placas internas.....	57
3.2.1.1.2 Preparación de las placas.....	57
3.2.1.1.3 Empaques de caucho reforzados.....	59
3.2.1.1.4 Preparación de empaques de caucho.....	59
3.2.1.1.5 Resina acrílica de alta dureza.....	60
3.2.1.1.6 Colocación de la resina.....	60
3.2.2 Depósito de electrolito.....	60



3.2.2.1	Constitución del depósito.....	61
3.2.2.2	Construcción del depósito.....	62
3.2.3	Atrapa llama.....	63
3.2.4	Amperímetro.....	64
3.2.5	Cañerías de goma transparente.....	66
3.2.6	Soportes de fijación.....	66
3.2.7	Cables.....	67
3.2.8	Características del relé.....	68
3.2.9	Conectores.....	69
3.2.10	Electrolito.....	69
3.3	Ubicación y distribución de cada uno de los componentes en el vehículo.....	70
3.3.1	Generador.....	70
3.3.2	Depósito.....	71
3.3.3	Atrapa llama.....	71
3.3.4	Relé.....	71
3.3.5	Amperímetro.....	72
3.3.6	Conector de la manguera de admisión de aire.....	72
3.4	Proceso de montaje del conjunto.....	73
3.4.1	Cañerías.....	73
3.4.2	Conexiones eléctricas.....	74
3.5	Calibración del sistema.....	75
3.5.1	Preparación del hidrolito.....	75
3.5.2	Amperaje requerido según el flujo de hidrógeno.....	75
3.6	Aspectos a ser considerados en cuanto a funcionamiento y seguridad.....	78
3.6.1	Abastecimiento del circuito.....	78
3.6.2	Funcionamiento del sistema.....	79

## **CAPITULO IV: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

4.1	Aceleración.....	81
4.1.1	Prueba de aceleración 0-100 m.....	82
4.1.1.1	Prueba a 2500 msnm.....	82
4.1.1.2	Prueba a 0 msnm.....	83
4.1.2	Prueba de aceleración 0-100 km/h.....	85

4.1.2.1 Prueba a 2500 msnm.....	85
4.1.2.2 Prueba a 0 msnm.....	86
4.2 Consumo.....	87
4.3 Velocidad máxima alcanzada.....	89
4.3.1 Prueba a 2500 msnm.....	89
4.3.2 Prueba a 0 msnm.....	90
4.4 Rendimiento: Km / galón, a nivel del mar y a 2500 msnm.....	90
4.5 Emisiones.....	92
4.5.1 Conclusiones.....	95
4.6 Durabilidad de los elementos constitutivos del motor.....	95
4.6.1 Válvulas.....	96
4.6.2 Cámara de combustión.....	96
4.6.3 Ductos.....	97
4.6.4 Parte superior del pistón.....	98
4.7 Relación costo del equipo – dinero economizado en combustible.....	100
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>101</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>104</b>
<b>GLOSARIO DE TERMINOS.....</b>	<b>103</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Punto de inflamación de algunos combustibles.....	7
Tabla 1.2 Temperatura de autoencendido de diferentes combustibles.....	8
Tabla 1.3 Energía mínima de la chispa.....	8
Tabla 1.4 Número de octano de diferentes combustibles.....	9
Tabla 1.5 Balances termodinámicos para la reacción a diferentes temperaturas y 1 atm.....	14
Tabla 2.1 Equivalentes energéticos entre diferentes combustibles.....	23
Tabla 2.2 Datos del motor G10 del auto suzuki forza.....	25
Tabla 2.3 Datos de la nafta extra.....	26
Tabla 2.4 Datos obtenidos de tablas termodinámicas necesarios para los cálculos.....	27
Tabla 2.5 Datos del hidrógeno.....	27
Tabla 2.6 Datos del hidrógeno necesarios para realizar los cálculos.....	27
Tabla 2.7 Datos de la mezcla nafta-hidrógeno al 5%.....	28
Tabla 2.8 Datos adicionales para realizar los cálculos.....	28
Tabla 2.9 Resultados del Punto 1 del ciclo de trabajo.....	28
Tabla 2.10 Resultados del Punto 2 del ciclo de trabajo.....	29
Tabla 2.11 Resultados del Punto 3 del ciclo de trabajo.....	30
Tabla 2.12 Resultados del Punto 4 del ciclo de trabajo.....	31
Tabla 2.13 Resultado de temperaturas y presiones en diferentes puntos del ciclo funcionando con nafta.....	38
Tabla 2.14 Resultado de temperaturas y presiones en diferentes puntos del ciclo funcionando con nafta – hidrógeno al 5%.....	39
Tabla 2.15 Resultado de temperaturas y presiones en diferentes puntos del ciclo funcionando con nafta – hidrógeno al 2%.....	40
Tabla 2.16 Resultados de temperaturas y presiones en diferentes puntos del ciclo funcionando con nafta – hidrógeno en diferentes porcentajes.....	41
Tabla 2.17 Masas y fracciones molares de los reactivos y productos para la gasolina.....	43

Tabla 2.18 Masas y fracciones molares de los reactivos y productos para el hidrógeno.....	44
Tabla 2.19 Masas y fracciones molares de los reactivos y productos para el sistema mixto.....	45
Tabla 2.20 Trabajo neto (W neto) nafta.....	46
Tabla 2.21 Trabajo neto (W neto) hidrógeno.....	46
Tabla 2.22 Trabajo neto (W neto) sistema mixto.....	46
Tabla 2.23 Potencia empleando nafta.....	47
Tabla 2.24 Potencia empleando hidrógeno.....	47
Tabla 2.25 Potencia empleando diferentes porcentajes de hidrógeno.....	47
Tabla 2.26 Energía en el sistema con nafta.....	48
Tabla 2.27 Energía en el sistema con hidrógeno.....	48
Tabla 2.28 Energía en el sistema con diferentes porcentajes de hidrógeno.....	48
Tabla 2.29 Los rendimientos térmicos obtenidos con nafta.....	49
Tabla 2.30 Los rendimientos térmicos obtenidos con hidrógeno.....	49
Tabla 2.31 Los rendimientos térmicos con diferentes porcentajes de hidrógeno....	49
Tabla 2.32 Rendimiento mecánico obtenidos con nafta.....	50
Tabla 2.33 Rendimiento mecánico obtenidos con hidrógeno.....	50
Tabla 2.34 Rendimiento mecánico con diferentes porcentajes de hidrógeno.....	50
Tabla 2.35 Eficiencia del ciclo con nafta.....	51
Tabla 2.36 Eficiencia del ciclo con 2% hidrógeno.....	51
Tabla 2.37 Eficiencia del ciclo con 5% de hidrógeno.....	51
Tabla 3.1 Niveles de funcionamiento del generador en función del amperaje.....	65
Tabla 3.2 Calibre del cable en función del amperaje.....	68
Tabla 4.1 Tiempos de aceleración con combustible nafta.....	82
Tabla 4.2 Tiempos de aceleración con sistema mixto.....	83
Tabla 4.3 Tiempos de aceleración con combustible nafta.....	83
Tabla 4.4 Tiempos de aceleración con sistema mixto.....	84
Tabla 4.5 Valores obtenidos con combustible nafta.....	85
Tabla 4.6 Valores obtenidos con el sistema mixto.....	86
Tabla 4.7 Valores obtenidos con combustible nafta.....	86

Tabla 4.8 Valores obtenidos con el sistema mixto.....	86
Tabla 4.9 Datos de consumos y costos obtenidos para alimentación a nafta y para sistema mixto.....	88
Tabla 4. 10 En la siguiente tabla podemos ver el consumo registrado a nivel del mar.....	91
Tabla 4. 11 Límites establecidos en la norma INEN, para las emisiones de CO y HC.....	92
Tabla 4. 12 Límites establecidos de la revisión técnica vehicular de Cuenca.....	93
Tabla 4. 13 Límites establecidos de la revisión técnica vehicular de Quito (Corpaire).....	93
Tabla 4. 14 Prueba de emisiones combustible nafta.....	94
Tabla 4. 15 Prueba de emisiones con sistema mixto.....	94
Tabla 4. 16 En términos generales el costo del equipo.....	99

**INDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1 Isótopos del hidrógeno.....	4
Figura 1.2 Límites de inflamabilidad de la mezcla hidrógeno oxígeno-nitrógeno....	7
Figura 1.3 Demandas energéticas del proceso electrolítico a presión ambiente en función de la temperatura.....	14
Fig. 2.1 Entalpía máxima y entalpía específica de diferentes combustibles.....	23
Fig. 2.2 Ciclo de trabajo ideal y real.....	33
Fig. 2.3 Curva de compresión en función del recorrido del pistón.....	36
Fig. 2.4 Curva de expansión en función del recorrido del pistón.....	36
Fig. 2.5 Valores de entropía y temperatura en cada punto del ciclo del sistema mixto.....	37
Fig. 2.6 Valores de entropía y entalpía en cada punto del ciclo en el sistema mixto.....	38
Fig. 2.7. Modificación del diagrama presión, volumen al 5 % hidrógeno.....	40
Fig. 2.8. Modificación del diagrama presión, volumen al 2% de hidrógeno.....	41
Fig. 3.1: Esquema general de la conexión con mangueras y cables para un vehículo a carburación.....	52
Fig. 3.2 Placas internas y empaques de hule del separador.....	54
Fig. 3.3 Vista lateral de las placas separadas por juntas de hule.....	54
Fig. 3.4 Placas de acero inoxidable con sus terminales eléctricos.....	55
Fig. 3.5 Placas positivas y negativas con sus respectivos terminales.....	55
Fig. 3.6 Tapa delantera del grupo separador con sus respectivos acoples rápidos...	56
Fig. 3.7 Proceso de armado del grupo de celdas.....	56
Fig. 3.8 Dimensiones de las placas internas del conjunto separador.....	57
Fig. 3.9 Proceso de taladrado de las placas internas.....	58
Fig. 3.10 Punzonado de las placas internas.....	58
Fig. 3.11 Empaque de caucho.....	59
Fig. 3.12 Sección del empaque de caucho (mm).....	60
Fig. 3.13 Vista del depósito.....	62
Fig. 3.14 Vista de la tapa del depósito, y los conductos de entrada y salida.....	63

Fig. 3.15 Vista del atrapa llama.....	64
Fig. 3.16 Placa electrónica del amperímetro.....	65
Fig. 3. 17 Soporte del depósito.....	66
Fig. 3. 18 Soporte de fijación de separador.....	66
Fig. 3.19 Relé y fusible del sistema eléctrico.....	68
Fig. 3.20 Acople rápido de las cañerías.....	69
Fig 3.21 Ubicación del generador electrolítico frente al radiador.....	70
Fig. 3.22 Ubicación del atrapa llama en el habitáculo.....	71
Fig. 3.23 Ubicación del amperímetro en la cabina.....	72
Fig. 3. 24 Ubicación del orificio en el depurador para la entrada del hidrógeno al motor.....	73
Fig. 3.25 Diagrama de conexiones eléctricas.....	74
Fig. 4.1 Prueba de aceleración de 0 a 100m a 2500msnm.....	82
Fig. 4.2 Prueba de aceleración de 0 a 100m a 0msnm.....	83
Fig. 4.3 Momento en que la velocidad llega a 100km/h.....	85
Fig. 4.4 Velocidad máxima a 2500msnm.....	89
Fig. 4.5 Velocidad máxima a 0msnm.....	90
Fig. 4.6 Cabezote desarmado previo a sus pruebas.....	96
Fig. 4.7 Estado del cabezote.....	97
Fig.4.8 Pruebas con el cabezote.....	97
Fig. 4.9 Visualización de ductos de admisión y escape.....	98
Fig. 4.10 Parte superior de la cabeza del pistón.....	98

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Fotografías construcción del generador electrolítico.....	105
Anexo 2: Pruebas de funcionamiento en carretera con el sistema mixto.....	105
Anexo 3: Amperímetro placa electrónica.....	106
Anexo 4: Niveles de trabajo del generador en función de su amperaje.....	107
Anexo 5: Distribución de las partes del sistema de alimentación de hidrógeno....	107
Anexo 6: Prueba de emisiones en el vehículo con un analizador de gases.....	114



Pablo Fernando Yuquilima Campoverde  
Guillermo Eduardo Vintimilla Calderón  
Trabajo de Graduación  
Ing. Fernando Guerrero  
Noviembre de 2012.

## **IMPLEMENTACIÓN EN UN VEHÍCULO CON MOTOR OTTO DE UN SISTEMA MIXTO DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE NAFTA – HIDRÓGENO**

### **INTRODUCCION**

En la actualidad, la mayor preocupación tanto en materia energética como medioambiental está centrada en encontrar opciones viables al vigente sistema de transporte urbano, que es el sector que más consume productos derivados de petróleo, y a pesar de los enormes avances logrados en este terreno, es el principal causante de la contaminación atmosférica en las grandes ciudades. Hoy en día se ha tornado indispensable la búsqueda de nuevas formas de energía, que sean amigables con el medio ambiente, pero a la vez eficientes en su aporte energético. Uno de los campos de mayor investigación es el de las formas de energía alternativas, que se caracterizan por ser producidas utilizando recursos naturales y con un reducido impacto ambiental. Es así que se están desarrollando una serie de avances en lo que tiene que ver con energía eólica, geotérmica, solar, hidráulica, etc. a la vez experimentando con nuevos combustibles como gas natural, hidrógeno, biodiesel, etanol, etc.

Mención aparte merece el hidrógeno, tema central de nuestro estudio, ya que es un gas de un alto poder energético, con un grado de contaminación nulo y de una abundancia prácticamente infinita en la naturaleza. Sin embargo, su uso es aún muy restringido, debido a las dificultades tanto técnicas como económicas de su obtención y empleo. Con el presente trabajo analizaremos la aplicabilidad del hidrógeno adicionado a la nafta en un sistema convencional de alimentación, con la finalidad de obtener una combustión de mejor calidad.

Para llevar a cabo nuestro trabajo, utilizaremos un dispositivo cuya función es la de separar el hidrógeno del oxígeno a partir de la molécula de agua, introduciéndolo en el múltiple de admisión; desde aquí es arrastrado hacia la cámara de combustión por el vacío generado durante el desplazamiento del pistón al interior del cilindro. Los cambios generados tanto en las prestaciones del vehículo así como en el rendimiento de combustible, serán analizados en el transcurso de la presente investigación.

## CAPITULO I

### ESTUDIO DEL HIDRÓGENO

#### 1.1 Generalidades

##### 1.1.1 Introducción al hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico que en la tabla periódica ocupa el primer lugar y está representado por la letra H, tiene un número atómico de 1 y una masa atómica también muy próxima a 1, dado que su isótopo más abundante tiene un núcleo únicamente constituido por un protón.

A temperatura y presión normales, esto es 273 K y 1 atm se presenta como un gas y es extremadamente inflamable, no teniendo color ni olor. Sus moléculas constituidas por dos átomos (molécula biatómica) comparten entre si sus dos únicos electrones. Está presente en el agua, el compuesto más abundante en la Tierra y en toda la materia orgánica, pudiendo reaccionar químicamente con muchos otros compuestos. Sus aplicaciones son diversas, incluyendo la producción de amoníaco, como combustible alternativo y como fuente de energía en células combustibles. A pesar de su abundancia en el universo, el hidrógeno es difícil de obtenerlo en grandes cantidades.

*“La primera utilización del hidrógeno fue en globos, en Francia durante el siglo XVIII, ya que en los primeros días de la aeroestación, proporcionaba la seguridad que el aire caliente no la brindaba, al requerir este último de fuego continuo.”<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> JACKSON Donald. Grandes Épocas de la Aviación. Los Aeronautas I. Ediciones Folio S. A. 2006. [consulta 21 de mayo 2011] Pp 45

### 1.1.2 Isótopos del hidrógeno

**El protio:** Es el isótopo más abundante, y su símbolo es H. Está constituido por un núcleo únicamente con un protón, en torno del cual orbita un electrón. Debido a su simplicidad fue crucial en el desarrollo de los modelos atómicos.

**El deuterio:** Su símbolo es  $2\text{H}$ , es un isótopo estable del hidrógeno que se encuentra en la naturaleza con una abundancia del 0,015% del total de átomos de hidrógeno (uno de cada 6500). El núcleo del deuterio está formado por un protón y un neutrón.<sup>2</sup>

**El Tritio:** Es un isótopo natural del hidrógeno; es radiactivo. Su símbolo es  $3\text{H}$ . Su núcleo consta de un protón y dos neutrones. En la figura 1.1 se muestran los isotopos del hidrógeno.

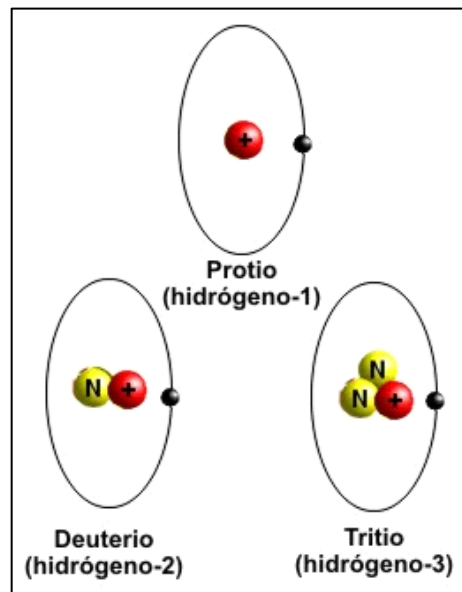


Figura 1.1: Isótopos del hidrógeno

Fuente: LAPIZARRADEYURI. Así funciona un arma termonuclear [en línea]  
<http://www.lapizarradeyuri.com//asi-funciona> [consulta 20 de Mayo 2011]

<sup>2</sup> SLIDESHARE. 2009. Energías Renovables. [en línea]. Colombia <<http://www.energias-renovables.>> [consulta 8 de mayo 2011]

### **1.1.3 Propiedades**

#### **1.1.3.1 Propiedades químicas**

- La molécula de hidrógeno, en condiciones usuales, es un gas incoloro, inodoro e insípido.
- Es la molécula más pequeña que se conoce.
- Su masa atómica es de 1,007940 kg / kmol
- Su densidad es 0,071 g/l a 273 K
- Tiene gran rapidez de transición de las moléculas a la fase gaseosa, de ahí la ausencia casi total del hidrógeno en la atmósfera terrestre.
- Gran facilidad de difusión y efusión.
- Buena conductividad calorífica.
- Estado de gas casi perfecto, lo que origina bajas temperaturas de licuefacción y fusión.

#### **1.1.3.2 Propiedades físicas**

- Es el elemento más abundante del universo, con un 90 % en peso, y el tercero más abundante en la Tierra.
- Su masa molecular es de 2,016 kg / kmol.
- Su estado de oxidación es +1, -1.
- Punto de fusión es de 14,025 K.
- Punto de ebullición es de 20,268 K.

- El H<sup>+</sup>, salvo en el estado gaseoso, en la química siempre se encuentra asociado, por ejemplo: H<sub>3</sub>O (catión oxonio).
- Tiene una estructura cristalina hexagonal.
- Si se deja evaporar rápidamente a baja presión se congela transformándose en un sólido incoloro.
- Es soluble en agua y la solubilidad no es afectada por la temperatura.
- El hidrógeno reacciona con la mayoría de los elementos no metálicos.

### **1.1.3.3 Otras propiedades**

#### **1.1.3.3.1 Poderes caloríficos superior e inferior**

El hidrógeno tiene un alto contenido de energía por unidad de masa, con un poder calorífico superior de 141 MJ/kg, e inferior de 119 MJ/kg. Estos valores son muy superiores a los de otros combustibles convencionales, siendo el poder calorífico inferior del hidrógeno alrededor de tres veces superior al de la gasolina<sup>3</sup>. Debido a su baja densidad en condiciones normales, tiene una baja densidad energética por unidad de volumen con un poder calorífico inferior por unidad de volumen de 10.79 MJ/m<sup>3</sup>. La densidad energética por unidad de volumen puede aumentarse al aumentar la presión o disminuir la temperatura.

La cantidad de energía liberada durante la reacción del hidrógeno, es cerca de 2,5 veces el calor producido en la combustión de los hidrocarburos más comunes (gasolina, diesel, metano, propano, etc.) El hidrógeno tiene un calor específico a presión constante (C<sub>p</sub>) de 28,623 kJ/kmol·K; y un calor específico a volumen constante (C<sub>v</sub>) de 20,309 kJ/kmol·K.

---

<sup>3</sup> FERNANDEZ Clara, BADIA Bolaños. 2009. Energética del Hidrogeno. Contexto, Estado Actual y Perspectivas de Futuro. [en línea]. <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3823/fichero>> [consulta 25 de mayo 2011] Pp. 74

### 1.1.3.3.2 Inflamabilidad

El hidrógeno no es explosivo, es una molécula estable y a diferencia de los explosivos, necesita una fuente de ignición externa para que se produzca la combustión, para lo cual son necesarias tres condiciones:

- Que se mezcle con aire, oxígeno u otros oxidantes.
- Que la mezcla este dentro de los límites de inflamabilidad (figura 1.2).
- Que la temperatura, presión y fuente de ignición sean las apropiadas.

Los límites de inflamabilidad del hidrógeno a una presión de 101.3 kPa y a una temperatura de 298 K, son de 4.1 % y 94 %. Una reducción en la presión por debajo de 101.3 kPa tiende a estrechar el rango de inflamabilidad, aumentando el límite inferior y disminuyendo el superior. En la tabla 1.1 se muestran estos valores.

Combustible	Punto de inflamación
Hidrógeno	< 20 K
Metano	85 K
Propano	169 K
Gasolina	230 K
Metanol	284 K

Tabla 1.1 Punto de inflamación de algunos combustibles

Fuente: FABREGA Mark. 2009. Hidrógeno. Aplicación en Motores de Combustión Interna. [En línea] España. <<http://www.upcommons.upc.edu/Hidrogeno.>> [consulta 10 de julio de 2011]. Pp. 57

Una mezcla inflamable puede ser diluida con sus propios componentes hasta que la concentración de la mezcla caiga fuera de los límites de inflamabilidad (límites inferior y superior). En la figura 1.2 se muestran los límites de inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-oxígeno-nitrógeno. Los valores son porcentuales.

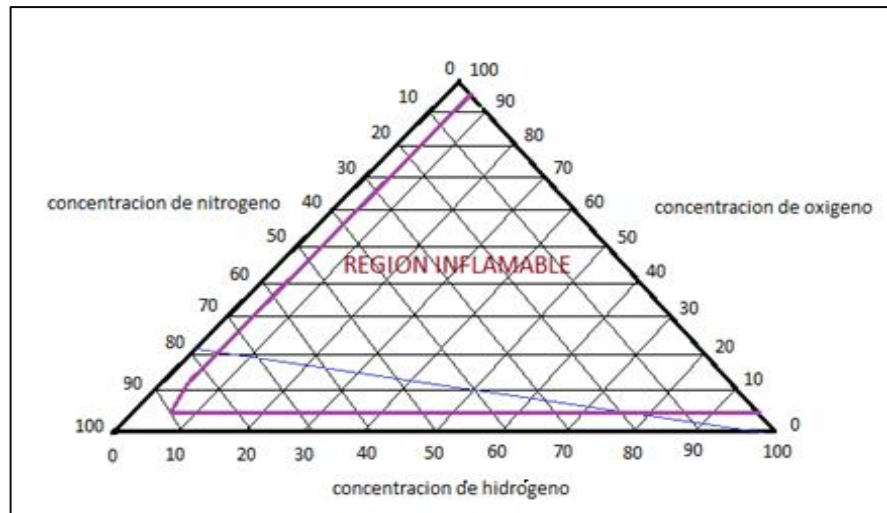


Figura 1.2. Límites de inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-oxígeno-nitrógeno

### 1.1.3.3 Temperatura de autoignición

Las temperaturas de ignición son dependientes de la concentración y presión del hidrógeno gaseoso y del tratamiento superficial de los depósitos. A una presión de 101.3 kPa, el rango de temperaturas de autoignición para hidrógeno estequiométrico en aire está entre 773 a 850 K (Tabla 1.2).

Combustible	Temperatura de autoencendido
Hidrógeno	773 a 850 K
Metano	813 K
Propano	763 K
Metanol	658 K
Gasolina	503 a 753 K

Tabla 1.2 Temperatura de autoencendido de diferentes combustibles

### 1.1.3.4 Energía mínima de la chispa para la ignición

Es la mínima energía de la chispa requerida para incendiar la concentración más fácilmente incendiabile del combustible en aire. La mínima energía de chispa requerida para incendiar el hidrógeno es considerablemente inferior que la del



metano (0.29 mJ) o la de la nafta (0.24 mJ); sin embargo, la energía de ignición de estos tres combustibles es lo suficientemente baja que resulta fácil su combustión en presencia de cualquier fuente de ignición débil como chispas, cerillas, superficies calientes. La electricidad estática de un cuerpo humano puede ser suficiente para incendiar cualquiera de estos combustibles en aire. En la Tabla 1.3 podemos ver la energía mínima de la chispa a diferentes presiones para provocar la ignición.

<b>Energía mínima de la chispa (mJ)</b>	<b>Presión (kPa)</b>
0.017	101.3
0.09	5.1
0.56	1.03

Tabla 1.3 Energía mínima de la chispa

#### 1.1.3.3.5 Número de octano

El número de octano describe las características antidetonantes de un combustible (Tabla 1.4) cuando se utiliza en un motor de combustión interna. Los golpeteos o picados son detonaciones secundarias, que ocurren después de la ignición del combustible debido a la acumulación de calor en ciertas zonas de la cámara de combustión. Cuando la temperatura local excede de la temperatura de autoencendido ocurren estos golpeteos. El hidrógeno posee un elevado número de octano, con lo que es especialmente resistente a golpeteos, aun cuando se realizan combustiones con mezclas muy pobres.

<b>Combustible</b>	<b>Número de octano</b>
Hidrógeno	130
Metano	125
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Diesel	30

Tabla 1.4 Número de octano de diferentes combustibles

### **1.1.3.3.6 Detonación**

El peor suceso resultante de la liberación de hidrógeno es que se mezcle con un oxidante (normalmente aire), que la mezcla se encuentre dentro de las concentraciones de detonación, produciendo una mezcla detonante. La flotabilidad positiva y la rápida difusión molecular del hidrógeno gaseoso hacen que cualquier escape se mezcle rápidamente con el gas de los alrededores. Si se produce la detonación, el resultado en la zona de reacción es una onda de choque y la onda expansiva que le acompaña tiene un gran potencial para causar daños personales o de equipos.

### **1.1.3.3.7 Transición de la detonación a la deflagración**

*“Una combustión hidrógeno-aire puede comenzar como una detonación o como una deflagración. Si ha empezado como deflagración puede transformarse en una detonación después de que la llama haya viajado una cierta distancia empleando un mecanismo de aceleración de la llama.”<sup>4</sup>*

El rango normalmente citado para la detonación de la mezcla hidrógeno-aire es de 18.5 al 59% de hidrógeno. Sin embargo con mayores energías de ignición estos límites se pueden ampliar. El rango de composición en el cual se puede desarrollar una detonación es más estrecho que el de una deflagración.

## **1.2 Formas de obtención del hidrógeno**

Existe una gran cantidad de formas de obtener hidrógeno, la mayoría de las cuales emplean hidrocarburos como materia prima. Si a esto adicionamos la alta demanda energética propia de estos procesos, tendremos como resultado que el empleo de hidrógeno como combustible no representara una ventaja frente a los combustibles fósiles. Es por eso que nos centraremos en la electrólisis, ya que mediante este

---

<sup>4</sup> FERNANDEZ Clara, BADIA Bolaños. 2009. Energética del Hidrogeno. Contexto, Estado Actual y Perspectivas de Futuro. [en línea]. <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3823/fichero>> [consulta 17 de junio 2011] Pp. 77

proceso el hidrógeno es obtenido a partir del agua, empleando energía eléctrica provista por el mismo sistema eléctrico del automóvil.

### 1.2.1 Electrólisis

La electrólisis consiste en la ruptura de la molécula de agua por acción de una corriente eléctrica. Cuando ocurre en condiciones ambientales el balance energético es el siguiente:



#### 1.2.1.1 Definición y características principales de la electrólisis

La electrólisis se produce por el paso de una corriente eléctrica a través de un conductor electrolítico (una disolución acuosa de un ácido, base o una sal) produciéndose un transporte de materia en las discontinuidades del sistema.<sup>5</sup> La corriente es enviada al interior del electrolito por medio de un par de electrodos a los cuales se les denomina ánodo y cátodo, que están conectados por alambres a una fuente de corriente. Cuando la corriente pasa por la disolución se produce la migración iónica, los iones con carga negativa serán atraídos por el ánodo y los iones cargados con signo positivo migran hacia el cátodo, produciendo reacciones químicas bajo la acción de una corriente eléctrica, en un sentido más amplio, cuando la corriente eléctrica pasa de un conductor eléctrico a una solución, los iones deben ganar o perder electrones, dando origen a cambios químicos.<sup>6</sup>

Los compuestos se ionizan cuando se disuelven en agua u otros líquidos polares; es decir, sus moléculas se disocian en componentes cargados positiva y negativamente que tienen la propiedad de conducir la corriente eléctrica. Si se coloca un par de electrodos en una disolución de un electrolito (o compuesto ionizable) y se conecta

---

<sup>5</sup> LENNTECH. 2011. Electrólisis. [en línea]. España. <<http://www.lenntech.es/electrolisis.htm>> [consulta 27 de junio de 2011]

<sup>6</sup> TECNOLOGIA 2010. Electricidad. [en línea]. España. <<http://www.tecnologia.maestrojuandeavila.es/temas/elec/elec.htm>> [consulta 2 de junio de 2011]

una fuente de corriente continua entre ellos, los iones positivos de la disolución se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia el positivo. Al llegar a los electrodos, los iones pueden ganar o perder electrones depositándose en los electrodos y transformándose en átomos neutros o moléculas.

### 1.2.1.2 Leyes de Faraday de la electrólisis

*“La magnitud de la descomposición química producida por una corriente, es decir, la cantidad de cualquier sustancia depositada o disuelta, es proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado.”<sup>7</sup>*

La primera ley de Faraday, en un proceso de electrodo: La cantidad de sustancia químicamente cambiada en la electrólisis es directamente proporcional a la fuerza de la corriente y al tiempo durante el cual actúa la corriente.

$$g = l \cdot t$$

$g$  = número de gramos del elemento depositado en uno de los electrodos.

$l \cdot t$  = número de coulombios,  $l$  es el número de amperios de corriente eléctrica que fluye,  $t$  el tiempo en segundos.

Si cada ion de una determinada clase entrega o recibe una cantidad definida de electrones en un proceso, la cantidad total de electricidad que pasa debe ser proporcional a la cantidad de iones que reaccionan, es decir, a la cantidad de sustancia que ha reaccionado.

*“La segunda Ley, señala que si la misma cantidad de electricidad pasa a través de distintos electrolitos, las cantidades de cada una de las sustancias que sufren cambios químicos son proporcionales a sus equivalentes químicos, para producir un equivalente gramo de cualquier sustancia, la cantidad de electricidad requerida es 96493,1, o en números redondos, 96500 Culombios, la cual se conoce con el nombre*

---

<sup>7</sup> FISICANET. 2010. Leyes de la Electrolisis. [ en línea ] Argentina. <<http://www.fisicanet.com.ar/química/Electrolisis>> [consulta 30 de junio de 2011]

de Faradio ( $F$ ). Expresada en amperios – hora, su valor es de 26801 amperios – hora”<sup>8</sup>.

En la práctica, el consumo real de corriente a causa del proceso mismo, excede en general en cierta medida del consumo calculado según esta ley. La relación entre la cantidad de sustancia realmente obtenida y la que debería obtenerse según el cálculo por el consumo de corriente, se conoce como eficiencia de corriente y se expresa como porcentaje.

Se aplican las dos leyes mediante la fórmula:

$$g = \frac{I \cdot t \cdot Eq}{p}$$

$g$  = Número de gramos del elemento depositado en uno de los electrodos.

$I$  = Número de amperios de corriente eléctrica que fluye.

$t$  = Tiempo en segundos.

$Eq$  = Equivalente químico.

$p$  = Número de Faraday.

### 1.2.1.3 Conductividad de los electrolitos

*“Las disoluciones al igual que los conductores electrónicos presentan resistencia al paso de la corriente eléctrica, obedeciendo así la ley de Ohm, excepto en condiciones extremas de voltajes elevados o corrientes de frecuencia muy alta.”*<sup>9</sup>

Si un conductor de resistencia  $R$  se le aplica una fuerza electro motriz de valor  $E$ , según la ley de Ohm la intensidad de corriente  $I$  que pasa es:

$$I = E / R$$

---

<sup>8</sup> FISICANET. 2010. Leyes de la Electrolisis. [En línea] Argentina. <<http://www.fisicanet.com.ar/química/electrolisis.>> [consulta 30 de junio de 2011]

<sup>9</sup> UAM. 2010. Medida de la conductividad de un electrolito fuerte. [en línea]. España. <[http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/josem/static.](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/josem/static)> [consulta 2 de julio de 2011]

### 1.2.1.4 Consumo de energía durante la electrólisis

La cantidad de electricidad que se necesita para descomponer el agua, está relacionada con el número de electrones que intervienen en la reacción electroquímica global. Según las reacciones que se dan en los electrodos, para la descomposición de un mol de agua, es necesario el paso de dos faradays de electricidad.

La potencia requerida para este proceso también tiene en cuenta el voltaje al cual se produce la electrólisis y el tiempo durante el cual se manifiesta la reacción. La corriente eléctrica fluye del ánodo al cátodo porque hay una diferencia de energía potencial entre los electrodos. La diferencia de potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo se mide en forma experimental con un voltímetro.

En efecto, a partir de los datos de la Tabla 1.5 se obtiene que la electricidad ( $\Delta g$ ) necesaria para disociar 1 mol de  $H_2O$  líquido a 298 K es 237,75 kJ, resultando 1 mol de  $H_2$ . Como el poder calorífico inferior del hidrógeno es de 241,82 kJ/mol resulta que se consumen 237,75 kJ eléctricos por cada 241,82 kJ contenidos en el hidrógeno, es decir, se producen 1,02 kJ de hidrógeno por cada kJ eléctrico consumido.<sup>10</sup>

Temperatura	$\Delta h$ [kJ/mol]	$T\Delta s$ [kJ/mol]	$\Delta g$ [kJ/mol]
298 K	286.43	48.72	237.75
1273 K	249.87	72.17	177.66

Tabla 1.5 Balances termodinámicos para la reacción a diferentes temperaturas y 1 atm

En la Fig. 1.3 se muestra la representación gráfica de esta variación. Se ve que la demanda eléctrica se va reduciendo a medida que la temperatura a la que se verifica la electrólisis aumenta, siendo la reducción mucho más significativa cuando el proceso ocurre con vapor de agua que con agua líquida. También se aprecia en esa figura que dicha demanda eléctrica se reduce principalmente porque aumenta la

<sup>10</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz. 2009. El Hidrogeno y la Energía. Primer Edición. Editado por la Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI. España. Pp. 44

demanda térmica ( $T\Delta s$ ), que a 727 K representa un 29,8% de la energía contenida en el hidrógeno producido.

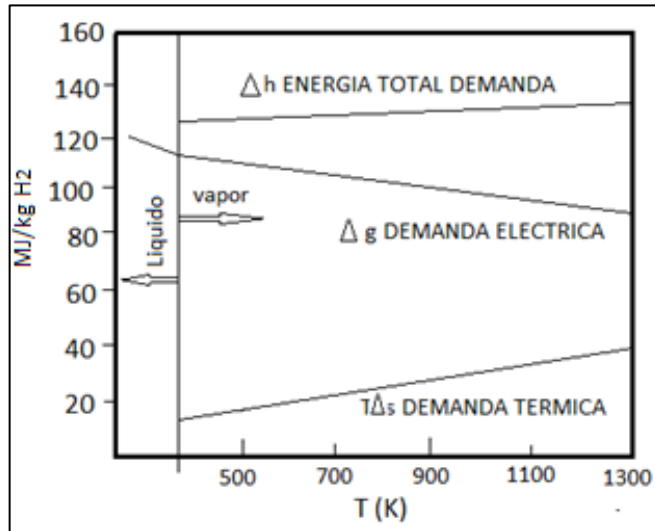


Figura 1.3 Demandas energéticas del proceso electrolítico a presión ambiente en función de la temperatura Fuente: BORJA Massoni. 2011. Hidrógeno como vector energético, teoría y práctica. [En línea]. España <<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/13729/1/proyecto%20encarnacion.pdf>> [consulta 24 de abril de 2011].Pp. 39

Los resultados anteriores sugieren por tanto dos formas de llevar a cabo la electrólisis:

### 1.2.1.5 Electrólisis a baja temperatura

El consumo eléctrico es muy elevado, del orden de la energía contenida en el hidrógeno producido. “Un electrolizador teórico que operase a 356 K consumiría 2,83 kWh de electricidad para producir 1 Nm<sup>3</sup> de hidrógeno, que contiene 3 kWh de energía química (poder calorífico inferior).”<sup>11</sup>

Este procedimiento, por tanto, sólo se justifica para obtener hidrógeno en pequeñas cantidades y en ausencia de otro tipo de suministros.

<sup>11</sup> LINARES José, MORATILLA Beatriz. 2009. El Hidrogeno y la Energía. Primer Edición. Editado por la Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI. España. Pp. 87

### **1.2.1.6 Electrólisis de alta temperatura**

El consumo de electricidad, siendo alto, comienza a resultar aceptable. Para esta operación se precisa disponer de vapor de agua y de una fuente térmica de elevada temperatura, que puede ser energía solar concentrada o energía nuclear de reactores avanzados. Los electrolizadores también han de ser modificados, pasando a ser óxidos sólidos.<sup>12</sup>

## **1.3 El hidrógeno como fuente de energía alternativa**

Debido a la necesidad que existe actualmente de reducir el nivel de contaminantes presentes en la atmósfera, principales causantes de problemas que están afectando seriamente a la humanidad como el efecto invernadero y la variación de los regímenes climatológicos, surge la necesidad de buscar nuevas soluciones que contribuyan al mejoramiento de estos problemas sin recurrir a limitación en la producción de energía. Una buena solución es cambiar de base energética utilizando un combustible con el cual se puedan eliminar o reducir notablemente las emisiones de contaminantes a la atmósfera y en este sentido, la propuesta más acertada es la utilización de hidrógeno como fuente de energía alternativa. Sin embargo, el hidrógeno no se encuentra en la naturaleza en estado puro y los diversos métodos de conseguirlo requieren unas técnicas que consumen mucha energía.

Si el objetivo es conseguir una economía basada en el hidrógeno para cumplir con los objetivos medioambientales de Kyoto, es necesario generar el hidrógeno de forma limpia e inagotable, pero la dificultad en la consecución del hidrógeno de manera masiva y no contaminante es precisamente uno de los principales obstáculos. Por ello, las investigaciones se centran en la búsqueda de un método que sirva para obtener hidrógeno de la manera más rápida y económica, puesto que su costosa producción resta beneficios a su uso como energía alternativa. En esta dirección,

---

<sup>12</sup> BORJA Massoni. 2011. Hidrógeno como vector energético, teoría y práctica. [en línea]. España <<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/13729/1/proyecto%20encarnacion.pdf>> [consulta 24 de abril de 2011]



distintas industrias del sector automovilístico están trabajando en el desarrollo de pilas de combustible para sus prototipos de vehículos propulsados por hidrógeno.<sup>13</sup>

### **1.3.1 El hidrógeno, la fuente de energía alternativa del siglo XXI**

En nuestros días, existen numerosos proyectos de investigación que pretenden aprovechar la energía del hidrógeno, e incluso, diversos especialistas afirman que la economía se debe sustentar en tecnologías basadas en dicho elemento. Existe una gran preocupación en el mundo económico, político y empresarial, debido a que la principal fuente energética actual, el petróleo, tiene los días contados. Por otra parte, el petróleo y los combustibles fósiles en general liberan monóxido y dióxido de carbono, agentes dañinos para la atmósfera, puesto que son causantes del efecto invernadero y su combustión produce sustancias altamente tóxicas.

El hidrógeno, por tanto, aparece como la tabla de salvación tanto del clima como de la economía y es el sustituto energético en el que los especialistas depositan más esperanzas. Pero, aunque todo el mundo está de acuerdo en que el hidrógeno será la fuente energética del futuro, también se reconoce que no existen minas de hidrógeno, y que sólo es posible obtener hidrógeno a partir de dos fuentes: el agua y los hidrocarburos mediante procesos que exigen una inversión de energía. Además, la extracción de hidrógeno a partir de hidrocarburos no representa una alternativa razonable al petróleo en la medida en que se está agotando y produce dióxido de carbono.

La obtención de hidrógeno como fuente de energía es un proyecto de resultado a largo plazo, y en todo caso, las previsiones más optimistas consideran que habrá que esperar a mediados del siglo XXI para que pueda tener un efecto positivo en el

---

<sup>13</sup> LACERCA.COM. 2007. Hidrógeno, una apuesta de futuro como energía alternativa no contaminante. [en línea]. España<<http://www.lacerca.com/etiquetas/1/alternativa>> [consulta 16 de abril de 2011]

mundo de la energía porque la economía del hidrógeno solo podrá existir si se encuentran formas baratas y sencillas de producir hidrógeno.<sup>14</sup>

#### **1.4 Importancia de la utilización del hidrógeno como fuente de energía motriz**

Una de las aplicaciones tradicionales del hidrógeno ha sido como combustible de cohetes y transportadores espaciales. Los programas espaciales son los mayores consumidores de hidrógeno líquido, habiendo adquirido gran experiencia en su manejo que puede ser la base de futuros desarrollos en otros campos.

El agotamiento de las reservas de combustible fósiles hará que en el futuro el hidrógeno sea una fuente de energía alternativa limpia, bien sea utilizado directamente por combustión o indirectamente por hidrogenación. Además proporciona una mayor liberación de energía por peso que cualquier otro combustible y no produce emisiones tóxicas como el CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub>, Etc.

El hidrógeno es un excelente combustible, haciendo que los motores basados en este gas sean un 20% más eficaz que los que emplean gasolina. Esta clara diferencia se debe a las características del hidrógeno. Su elevada difusividad facilita la formación de mezclas combustible-aire mucho más homogéneas que con cualquier otro combustible.<sup>15</sup>

Su amplio intervalo de inflamabilidad (4-75%) hace que sea capaz de arder en mezclas pobres con ello se consigue una mayor facilidad de arranque (también relacionada con su baja energía de ignición), que la combustión sea más completa y una mejor economía del combustible. Además, la temperatura final de combustión es menor minimizando la formación de óxidos de hidrógeno.

Su alta temperatura de auto ignición permite mayores relaciones de compresión en los pistones proporcionando mayores eficacias térmicas. La gran ventaja del hidrógeno como combustible es que el producto de su combustión es agua, cerrando

---

<sup>14</sup> CASVITACURA. 2009. Hidrógeno, la fuente de energía del futuro. [en línea]. Chile. <[http://www.casvitacura.cl/NOTICIAS/ANTERIORES%20%20NOTICIAS/HIDROGENO/HIDROGENO\\_iframe.html](http://www.casvitacura.cl/NOTICIAS/ANTERIORES%20%20NOTICIAS/HIDROGENO/HIDROGENO_iframe.html)> [consulta 11 de abril de 2011]

<sup>15</sup> SCRIBD. 2011. Aplicaciones del hidrógeno. [en línea]. USA. <<http://es.scribd.com/doc/11562376/Aplicaciones-Del-Hidrogeno>> [consulta 28 de mayo de 2011]

el ciclo con un producto del cual se partió para generarlo. El principal inconveniente del hidrógeno es su baja densidad energética volumétrica que lleva a la necesidad de grandes tanques de almacenamiento, ya que la mezcla estequiométrica aire – combustible en los cilindros del motor tienen un menor contenido energético produciéndose una pérdida de potencia. El uso de técnicas avanzadas de inyección del combustible o de hidrógeno líquido podría ser una mejora para estos problemas.<sup>16</sup>

#### **1.4.1 Funcionamiento de un motor de hidrógeno**

La posibilidad de alimentar hidrógeno gaseoso como combustible en automoción demanda atención debido a que reduce la formación de contaminantes durante la combustión. Solamente se forma  $H_2O$  y cantidades mínimas de  $NO_x$  cuando se utiliza aire como oxidante pero no se forman óxidos de carbono, según los ensayos realizados con un motor provisto de un solo cilindro y utilizando gas hidrógeno como combustible.<sup>17</sup>

Se observó que en condiciones de alimentación correspondientes a relaciones equivalentes inferiores a 0,56, las emisiones de  $NO_x$  resultaron extraordinariamente bajas. A ello hay que añadir la mayor eficiencia térmica del hidrógeno que del isoctano o la nafta.

#### **1.4.2 Aspectos técnicos de los motores a nafta e hidrógeno**

##### **1.4.2.1 Ignición**

Las bujías para los motores de hidrógeno deben estar clasificadas como frías y cuyos extremos no sean de platino. Una bujía fría es aquella que transfiere el calor desde el extremo de la misma a la cabeza del pistón de manera más rápida que una de tipo caliente. Esto significa que la posibilidad de que la punta de la bujía produzca la

---

<sup>16</sup> SCRIBD. 2011. Aplicaciones del hidrógeno. [en línea]. USA. <http://es.scribd.com/doc/11562376/Aplicaciones-Del-Hidrogeno> [consulta 28 de mayo de 2011]

<sup>17</sup> ESTRUCPLAN. 2009. El hidrógeno: un vector energético no contaminante para automoción. [en línea]. Argentina. <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=786> [consulta 30 de mayo de 2011]

ignición de la mezcla de aire / combustible es reducida. Las bujías de tipo caliente están diseñadas para mantener una cierta cantidad de calor, con lo que no se acumulan restos carbonosos. Puesto que el hidrógeno no contiene carbón, las bujías de tipo caliente no presentan un interés especial en este tipo de motores. Las bujías de platino tampoco son recomendables, ya que el platino podría actuar como catalizador de la ignición.<sup>18</sup>

#### **1.4.2.2 Carburación**

El método más simple de entregar combustible al motor es utilizando un carburador. Es el que permite pasar de un motor de nafta a uno de hidrógeno de mejor manera. Además, no se requiere una presión de suministro del combustible tan elevada como en otros métodos de suministro.

El inconveniente de la carburación es que resulta más susceptible a la combustión irregular, problemas de preencendido y retroceso de llama. La mayor cantidad de mezcla aire - hidrógeno dentro del conducto de admisión agrava los efectos del preencendido.<sup>19</sup>

### **1.5 Almacenamiento, manejo y precauciones durante la manipulación del hidrógeno**

#### **1.5.1 Almacenamiento de hidrógeno**

*“La mayoría de las investigaciones dirigidas al almacenamiento de hidrógeno se enfocan en almacenarlo de manera compacta y ligera para vehículos alimentados por hidrógeno.”<sup>20</sup>*

---

<sup>18</sup> FABREGA Mark. 2009. Hidrógeno. Aplicación en Motores de Combustión Interna. [en línea] España. 116. <<http://www.upcommons.upc.edu/Hidrogeno>> [consulta 10 de julio de 2011]. Pp. 117

<sup>19</sup> FABREGA Mark. 2009. Hidrógeno. Aplicación en Motores de Combustión Interna. [en línea] España. 116. <<http://www.upcommons.upc.edu/Hidrogeno>> [consulta 10 de julio de 2011]. Pp. 118

<sup>20</sup> PÉREZ José, HIERRO Ignacio de Loyola. 2008. Análisis de la Situación Actual y el Potencial del Hidrógeno Como Vector Energético en el Futuro. España [en línea]. <<http://es.scribd.com/doc>> [consulta 14 de julio de 2011]

El hidrógeno, en comparación con los hidrocarburos (como la nafta o el propano) es mucho más difícil de almacenar y transportar. El gas de hidrógeno tiene buena densidad por volumen, pero mala comparada con la de los hidrocarburos, por lo tanto requiere de un tanque más grande para ser almacenado. Un tanque más grande requiere mayor espacio y será más pesado que un tanque pequeño utilizado para almacenar la misma cantidad. Incrementar la presión, mejora el volumen por densidad haciendo los tanques más pequeños, pero no más livianos.

Obtener hidrógeno comprimido requiere energía para usar el compresor; mayor compresión significa más energía perdida en dicho paso. Los tanques también deben estar bien aislados para prevenir evaporación. Los tanques con aislante térmico suelen ser caros y delicados. Asumiendo que todo eso sea resuelto, el problema de la densidad se mantiene.

### **1.5.2 Precauciones generales**

Normalmente los incendios de hidrógeno, no se intentan extinguir hasta que la alimentación de hidrógeno se ha cerrado, ya que siempre existe el riesgo de reignición o explosión. La reignición puede ocurrir si la mezcla entra en contacto con una superficie metálica lo suficientemente caliente. Para evitar este riesgo es muy importante emplear agua u otros medios para su enfriamiento.

Los equipos que contienen hidrógeno deben mantenerse fríos mediante agua pulverizada, para disminuir la magnitud de la fuga de hidrógeno, evitando la transmisión térmica y su posible influencia en cualquier fuego que pudiera aparecer. Los pequeños fuegos de hidrógeno pueden combatirse mediante extintores de polvo químico seco o con dióxido de carbono, nitrógeno y vapor. El caudal mínimo a aplicar mediante extintor es de  $8.14 \text{ l/min}\cdot\text{m}^2$  de superficie expuesta. El polvo químico seco es mejor que el dióxido de carbono porque son capaces de hacer visibles las llamas.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> ENERGIASOSTENIBLE.NET. 2003. Prevención y extinción de incendios de hidrógeno.[en línea]. Argentina. <[http://www.energiasostenible.net/prevencion\\_extincion\\_hidrogeno.htm](http://www.energiasostenible.net/prevencion_extincion_hidrogeno.htm)> [consulta 10 de julio de 2011]

### 1.5.3 Fugas

Las moléculas del gas de hidrógeno son mucho más pequeñas que las del resto de gases, con lo que pueden difundirse a través de muchos materiales considerados herméticos o impermeables a otros gases. Esta característica hace del hidrógeno un elemento más difícil de contener que otros gases. Si se produce un escape de hidrógeno, la fuga se evaporará muy rápidamente, ya que el punto de ebullición de este elemento es extremadamente bajo.

Las fugas de hidrógeno son peligrosas, ya que con ellas existe el riesgo de que se produzca fuego al mezclarse con el aire. No obstante, el pequeño tamaño de la molécula que aumenta la probabilidad de que se produzca una fuga, también da lugar a que el hidrógeno que haya escapado del lugar donde estaba almacenado se diluya rápidamente, especialmente si nos encontramos al aire libre. Cuando el hidrógeno se utiliza como combustible, la posibilidad de que se produzca una fuga implica una especial atención en el diseño del sistema de alimentación, para asegurarse de que cualquier fuga pueda dispersarse y diluirse en el ambiente.<sup>22</sup>

### 1.5.4 Toxicidad

El hidrógeno no resulta tóxico, pero puede actuar como asfixiante ya que desplaza el oxígeno que se encuentra en el aire. Los niveles de oxígeno por debajo del 19,5% resultan insuficientes para los seres humanos. Los efectos de la deficiencia de oxígeno pueden incluir una disminución de las capacidades mentales, coordinación muscular deteriorada, falta de juicio, depresión, inestabilidad emocional y fatiga. Con concentraciones inferiores al 12% de oxígeno, se produce inconsciencia inmediata, sin síntomas de alerta anteriores.<sup>23</sup>

El hidrógeno inhalado puede dar lugar a una mezcla inflamable dentro del cuerpo. La inhalación de hidrógeno puede producir inconsciencia y asfixia. Debe tenerse en cuenta, además, que el resto de gases que puedan encontrarse mezclados con el

---

<sup>22</sup> FÀBREGA Marc 2011. "Hidrógeno. Aplicación en motores de combustión interna" [en línea]. USA.<http://es.scribd.com/doc/73515119/62/Fugas> [consulta 10 de julio de 2011]

<sup>23</sup> FABREGA Mark. 2011. Hidrógeno. Aplicación en Motores de Combustión Interna. [en línea] España. Pp 51. <<http://www.upcommons.upc.edu/Hidrogeno.>> [consulta 22 de julio de 2011]

hidrógeno, al haber sido éste extraído de otros combustibles fósiles, como por ejemplo nitrógeno, monóxido de carbono, bióxido de carbono y otros, pueden también actuar como asfixiadores desplazando el oxígeno. Además, el monóxido de carbono es un gas venenoso, con lo que se presenta como un elemento peligroso para la salud.

### **Conclusiones**

El hidrógeno se presenta como una fuente de energía abundante y limpia que en un futuro próximo reemplazará a los combustibles de origen fósil. Pese a las bondades que ofrece su empleo, su uso es aún muy limitado debido principalmente a los altos costos que representa su obtención y a la dificultad propia de estos procesos.

En el desarrollo del presente capítulo se estudió las múltiples propiedades del hidrógeno, datos que serán utilizados para tener mayor conocimiento en cuanto al comportamiento del hidrógeno en diferentes condiciones. Como se analizó en este capítulo, para nuestro trabajo, la forma más idónea para obtener hidrógeno es por medio de la electrólisis del agua, que si bien ocupa una cantidad apreciable de energía, es mayor el beneficio obtenido.

## CAPITULO II

### ESTUDIO TERMODINÁMICO DEL HIDRÓGENO

Una vez explicado sobre propiedades, características, producción de hidrógeno, almacenamiento y seguridad al manipular el hidrógeno, procederemos en este capítulo con el estudio termodinámico referente a presiones y temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos de trabajo para realizar el ciclo Otto, así como entropías, entalpías, energías y volúmenes, además de eficiencia térmica y trabajo neto que se van detallando a través de la utilización de tablas de propiedades, fórmulas y estudio de la modificación de las relaciones por la presencia de hidrógeno.

A través de este estudio vamos a determinar lo que sucede en un motor internamente, los cambios que va a sufrir, garantizando de esta manera hasta que porcentajes de hidrógeno, se le puede adicionar a la mezcla, para no afectar el normal funcionamiento del motor.

#### **2.1 Comparación de aportes energéticos de la nafta - hidrógeno.**

Existen diversos criterios a la hora de elegir un combustible para un fin determinado. Entre los más importantes podemos mencionar: su costo, la facilidad con que se quema, la facilidad de transporte y almacenaje, su peligrosidad y la contaminación que puede causar. Desde un punto de vista estrictamente termoquímico, el factor fundamental a la hora de establecer la calidad de un producto químico que se emplea como combustible es la cantidad de energía que se transfiere en forma de calor por cada gramo de combustible combustionado con oxígeno. A este valor se le denomina entalpía específica (en unidades kJ/g). Como puede apreciarse en la figura 2.1, los valores más elevados de entalpía de reacción no corresponden necesariamente con los valores máximos de entalpía específica.



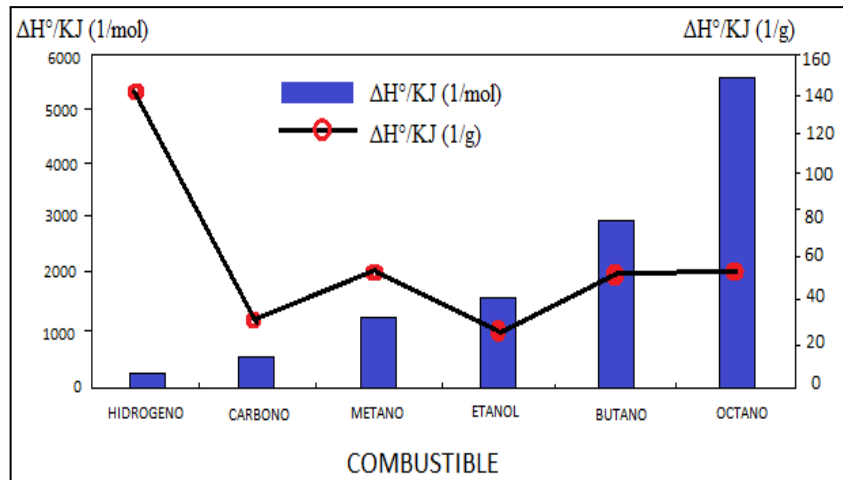


Fig. 2.1 Entalpía máxima y entalpía específica de diferentes combustibles.  
 Fuente: GRUPO LENTISCAL. 2009. "Contenidos CTS de termoquímica." [en línea]. España.  
 <<http://www.gobiernodecanarias.org/educacion/3/usrn/lentiscal/1-cdquimica-tic/ctsa/ctstermo.pdf>>  
 [consulta 10 de julio de 2011]

Los combustibles convencionales como la nafta o el Diesel poseen una entalpía específica de unos 48 kJ/g. Tienen la ventaja de poseer una densidad de entalpía (en unidades MJ/l) elevada. Por ejemplo, la nafta tiene una densidad de entalpía de 38 MJ/l, que contrasta con la del hidrógeno líquido (10 MJ/l). Esta circunstancia permite que los depósitos de combustible de los automóviles no necesiten ser muy voluminosos para almacenar una gran reserva de energía.

Equivalente energético	Metros cúbicos hidrógeno gaseoso	Líquido litros hidrógeno	Kilogramos hidrógeno
Litros de Gasolina	0.352	0.279	3.93
Litros de Metanol	0.676	0.536	7.55
Litros de Diesel	0.279	0.221	3.12
Metros cúbicos $H_2$ Gas	1	0.792	11.2
Litros $H_2$ Líquido	1.26	1	14.1

Tabla 2.1 Equivalentes energéticos entre diferentes combustibles  
 Fuente: PETROTECNIA. Equivalentes energéticos entre diferentes combustible. [en línea]  
[http://www.petrotecnica.com.ar/febrero1/./tablas\\_67pdf](http://www.petrotecnica.com.ar/febrero1/./tablas_67pdf). [Consulta 20 de Mayo 2012]

## **2.2 Cálculos de presiones y temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión**

Para el desarrollo de nuestro estudio se aplica el cálculo del ciclo Otto ideal, trabajando con un sistema de alimentación de combustible a nafta, hidrógeno y mixto (Aire + nafta + hidrógeno). Respecto al sistema mixto es importante mencionar que es la interacción de dos combustibles que van a ser dosificados e introducidos para ser quemados en el interior de la cámara. Para nuestro caso, se trabaja introduciendo un porcentaje de hidrógeno mientras el ciclo de funcionamiento se da normalmente con aire - nafta.

### **2.2.1 Observaciones para el cálculo termodinámico del ciclo Otto**

- 1.- Para el estudio se considera el ciclo Otto como real.
- 2.- Calores específicos variables para los reactivos y productos que intervienen en la ecuación estequiométrica.
- 3.- Una eficiencia volumétrica del motor de un 90 %.
- 4.- Para la realización del cálculo del ciclo Otto que trabaja con nafta se tomaron en cuenta los datos del combustible (nafta extra) obtenidos de tablas o datos ya registrados.
- 5.- En el caso del hidrógeno, se investigaron datos necesarios para los cálculos, como tablas, fórmulas y relaciones que se deben tener en cuenta para que se realice el ciclo de funcionamiento.
- 6.- Los cálculos para el sistema mixto se ejecutaron con un porcentaje máximo de un 5%, porque en cantidades mayores presenta inestabilidad.
- 7.- Para el estudio de la relación estequiométrica empleando nafta, hidrógeno y en el sistema mixto, no se considera la formación de CO, NOX y HC ya que en este punto se consideró el ciclo como ideal (tabla 2.17, 2.18, 2.19). Estos valores son obtenidos a través de una prueba de emisiones.

8.- Tomamos el punto 3 de la figura 2.2 (ciclo de trabajo ideal - real) como el más crítico, ya que las presiones y temperaturas son las más altas alcanzadas en el ciclo.

9.- En el proceso de combustión se toma la relación de calores específicos para cada combustible y en el caso del sistema mixto se considera una reducción de un 0,2.<sup>24</sup>

10.- En el proceso de combustión se considera la relación de calores específicos ( $k$ ) según el tipo de combustible utilizado (tabla 2.4, 2.6, 2.8).

### 2.2.2 Datos para el cálculo del ciclo termodinámico Otto

Los datos de la siguiente tabla pertenecen al automóvil marca Suzuki, modelo Forza, motor G10, el cual utilizaremos para nuestro estudio.

Datos del motor		
Relación de compresión	8,3	1
Carrera	77	mm
Diámetro del cilindro	74	mm
Número de cilindros	3	
Cilindrada total	993,45	cc

Tabla 2.2 Datos del motor G10 del auto Suzuki Forza

A continuación especificamos las propiedades de cada combustible. Adicionamos dentro de cada tabla datos referentes a temperaturas, presiones, volúmenes, coeficientes, constantes y relaciones de calores específicos. Incluimos la descripción de términos previo al desarrollo de los cálculos.

<sup>24</sup> YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2001 – Termodinámica – University of Nevada, North Carolina State University – cuarta edición. [consulta 20 de abril 2012] Pp. 724

### 2.2.3 Descripción de términos utilizados para los cálculos

Energía específica (kJ/kg): Cantidad de energía liberada por unidad de masa.

RON: (Número de octano investigado) Conocido generalmente como número de octanaje, bajo condiciones moderadas de trabajo del motor.

MON: (Número de octano del motor) Octanaje probado en un motor estático. Se utiliza este índice para probar motores en condiciones extremas.

PCI (kJ/kg): Poder Calorífico inferior del combustible.

$C_{vm}$  (cal/kg\*°C): Es el calor específico medio a volumen constante de los productos de combustión.

Rendimiento volumétrico: Denominado también coeficiente de llenado, es la relación entre la masa de aire aspirada efectivamente en cada ciclo y la que teóricamente podría llenar un volumen de cilindrada en las condiciones de presión y temperatura exteriores.

Para la compresión real, se utiliza el valor del exponente de la politrópica de compresión " $n_c$ " ya que varía las condiciones durante la compresión. Para motores de alta relación de compresión se recomiendan los valores más altos.

Motores a nafta de alta velocidad: <sup>25</sup>  $n_c = 1.3$  al  $1.32$

Motores a hidrógeno:  $n_c = 1.38$  al  $1.4$

Para la expansión real, es utilizado el valor del exponente de la politrópica de expansión " $n_e$ " ya que varían los componentes durante la expansión.

Motores a nafta de alta velocidad:  $n_e = 1.23$  a  $1.32$

Coeficiente de Dilución: Se considera como una variante entre la presión y la temperatura en el proceso de funcionamiento dentro del cilindro.

Relación de calores específicos ( $k$ ): Es la relación entre  $C_v$  (calor a volumen constante) y  $C_p$  (calor a presión constante)

---

<sup>25</sup> R MAGALLANES –Termodinámica de motores – [en línea] <<http://www.monografias.com/trabajos13/cinemat/cinemat2.shtml#Teorco>>. [consulta 31 mayo 2012]

### 2.2.4 Cálculos para el combustible nafta

Datos combustible (nafta extra)	
Energía específica (kJ/kg):	290
RON:	87
MON:	81
PCI (kJ/kg):	4400
Cvm (cal/kg°C):	0,30

Tabla 2.3 Datos de la nafta extra

Fuente: LAGUÍA. 2010. Octanaje (Índice de Octano). [en línea]. España <<http://quimica.laguia2000.com/general/octanaje-indice-de-octano>> [consulta 10 de julio de 2011]

Datos de tablas				
Presión de admisión:	0,8	kg/cm <sup>2</sup>	Coeficiente de la politrópica de compresión $\eta_c$ :	1,32
Rendimiento volumétrico:	90	%		
Coeficiente de dilución:	0,03		Relación estequiométrica (E):	14,8740
Temperatura inicial dentro del cilindro:	350	K	Rendimiento de la combustión:	0,88
Constante del gas ideal (R):	29,28	(kgm/kg*K)	Coeficiente de la politrópica de expansión $\eta_e$ :	1,23
Relación de calores específicos (k)	1,4			

Tabla 2.4 Datos obtenidos de tablas termodinámicas necesarios para los cálculos

Fuente: YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2001 – Termodinámica – University of Nevada, North Carolina State University – cuarta edición. [consulta 20 de abril 2012]

### 2.2.5 Cálculos para el combustible hidrógeno

Datos combustible (hidrógeno)	
Energía específica (kJ/kg):	14400
RON:	135
MON:	70
PCI (kJ/kg):	12000
Cvm (cal/kg°C):	0,32

Tabla 2.5 Datos del hidrógeno

Fuente: CIENTIFICOSAFICIONADOS.COM. 2011. Hidrógeno en motores Diesel. [en línea]. España <<http://www.cientificosaficionados.com/foros/viewtopic.php?p=101853&sid=a0aff4a95cec7976102fff40e3c6404f>> [consulta 10 de julio de 2011].

Datos de tablas				
Presión de admisión:	0,8	kg/cm <sup>2</sup>	Coeficiente de la politrópica de compresión $\eta_c$ :	1,4
Rendimiento volumétrico:	90	%		
Coeficiente de dilución:	0,03		Relación estequiométrica (E):	33,7124
Temperatura dentro del cilindro:	350	K	Rendimiento de la combustión:	0,88
Constante del gas ideal (R):	420,81633	kgm/kg*K	Coeficiente de la politrópica de expansión $\eta_e$ :	1,32
Relación de calores específicos (k)	1,405			

Tabla 2.6 Datos del hidrógeno necesarios para realizar los cálculos.  
Fuente: YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2001 – Termodinámica – University of Nevada,  
North Carolina State University – cuarta edición. [consulta 18 de abril 2012]

### 2.2.6 Cálculos para el sistema mixto

Datos combustible (sistema mixto)	
Energía específica (MJ/kg):	1010
RON:	94
MON:	85
PCI (kJ/kg):	12000
C <sub>vm</sub> (cal/kg*C):	0,40

Tabla 2.7 Datos de la mezcla nafta - hidrógeno al 5%

Datos de tablas				
Presión de admisión:	0,8	kg/cm <sup>2</sup>	Coeficiente de la politrópica de compresión $\eta_c$ :	1,3
Rendimiento volumétrico:	90	%		
Coeficiente de dilución:	0,03		Relación estequiométrica:	15,2007
Temperatura dentro del cilindro:	350	K	Rendimiento de la combustión:	0,4
Constante del gas ideal (R):	848,387	kgm/kmol*K	Coeficiente de la politrópica de expansión $\eta_e$ :	1,23
Relación de calores específicos:	1,225			

Tabla 2.8 Datos adicionales para realizar los cálculos.  
Fuente: YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2001 – Termodinámica – University of Nevada,  
North Carolina State University – cuarta edición. [consulta 22 de abril 2012]

### 2.2.7 Cálculo de los puntos del ciclo termodinámico Otto

A continuación se presentan tablas del estudio de los cuatro puntos del ciclo de trabajo real Otto. Los valores son conseguidos a través de un programa realizado en Excel que cuenta con datos del motor, fórmulas, porcentajes, tablas y conversiones, para los diferentes combustibles (nafta, hidrógeno, mezcla).

#### PUNTO 1

PUNTO 1			
	Nafta	Hidrógeno	Mezcla
Entalpía (kJ/kg)	350.6413	9.7527	-236.5223
Entropía (kJ/kg)	1.8575	134.4809	349.4745
Energía (kJ/kg)	285.6597	6.9575	119.5728

Tabla 2.9 Resultados del punto 1 del ciclo de trabajo

Para nuestros cálculos hemos considerado como temperatura (350,15 K) debido a que el aire atmosférico sufre un incremento de temperatura al ingresar al cilindro. La presión inicial se considera la atmosférica (0,8 kg/cm<sup>2</sup>). La entalpía, entropía y energía se obtienen a partir de la tabla A.17 (propiedades del gas ideal del aire).<sup>26</sup>

Es necesario realizar interpolaciones ya que las temperaturas que se obtiene no existen en las tablas. Durante la admisión (trayecto 0-1), el cilindro se llena de mezcla que ocupa teóricamente todo el volumen del mismo. Consideramos que la presión existente en la fase de admisión es isóbara (presión constante).<sup>27</sup>

<sup>26</sup> YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2007 – Termodinámica – University of Nevada, North Carolina State University – cuarta edición. [consulta 18 de abril 2012] Pp. 747

<sup>27</sup> ANGEL SAENZ GONZALES - 2000. Tecnología de la automoción. Edición cuarta. . [Consulta 17 de abril 2012]. Pp. 20

**PUNTO 2**

<b>PUNTO 2</b>			
	<b>Nafta</b>	<b>Hidrógeno</b>	<b>Mezcla</b>
Temperatura (K)	689.222	816.367	660.659
Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	11.1094	13.933	11.2755
Entropía (kJ/kg)	701.688	23.291	-236.5223
Entalpía (kJ/kg)	2.5561	159.512	350.3993
Energía (kJ/kg)	503.8408	16.694	119.8924

Tabla 2.10 Resultados del punto 2 del ciclo de trabajo

Para obtener los valores de entalpía, entropía y energía en este punto, es necesario conocer la temperatura alcanzada al final de la compresión. Para esto utilizamos la fórmula

$$T_2 = T_1 * R_c^{\alpha-1} \quad 28$$

Al valor de  $\alpha$  se lo conoce también como exponente calorimétrico. Para la nafta este valor es de 1,32 mientras que para el hidrógeno es 1,4. Obtenemos la presión en este punto del ciclo mediante la siguiente fórmula:

$$P_2 = R_c * \frac{P_1 \cdot T_1}{T_2} \quad 29$$

Durante la compresión (trayecto 1-2), la mezcla es comprimida en el interior del cilindro hasta que en el punto 2 alcanza una presión correspondiente a su relación de compresión (relación volumétrica). Durante este recorrido y para efectuar la compresión de la mezcla, se gasta una cantidad de trabajo que es aportado por el volante de inercia, merced a la energía almacenada en el mismo durante el ciclo anterior.

Considerando esta curva (1-2) adiabática, es decir, que el recorrido se verifica sin pérdidas de calor a través de las paredes del cilindro, la temperatura alcanzada por la

<sup>28</sup> ANGEL SAENZ GONZALES - 2000.Tecnología de la automoción. Edición cuarta. . [Consulta 17 de abril 2012]. Pp. 20

<sup>29</sup> ANGEL SAENZ GONZALES - 2000.Tecnología de la automoción. Edición cuarta. . [Consulta 12 de abril 2012]. Pp. 21-22



mezcla en el punto 2, es la correspondiente al calor absorbido en la transformación del trabajo aportado por el volumen para comprimir la mezcla, el cual está en función de la relación de compresión.

### PUNTO 3

PUNTO 3			
	Nafta	Hidrógeno	Mezcla
Temperatura (K)	1472.39	1723.98	1115.76
Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	25.1293	29.4223	19.0426
Entropía (kJ/kg)	3.4227	3.4227	351.1218
Entalpía (kJ/kg)	1602.6013	51.9796	-235.8601
Energía (kJ/kg)	1179.9292	1179.9292	120.3747

Tabla 2.11 Resultados del punto 3 del ciclo de trabajo

Para obtener la temperatura en este punto, es necesario calcular el incremento de la temperatura ocasionado por la combustión de la mezcla. A este factor se lo denomina “salto térmico” y se lo obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$\Delta T = \frac{\eta_m * Q}{C_{vm} * (1 + cd)} \quad 30$$

$\eta_m$  = Rendimiento de la combustión

$Q$  = Energía Calorífica del combustible (cal/kg\*°C)

$C_{vm}$  = Calor específico medio a volumen constante. (cal/kg\*°C)

$cd$  = Coeficiente de dilución.

El valor de  $Q$  a su vez se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{PCI}{AC} \quad (\text{cal/kg } ^\circ\text{C}) \quad 31$$

<sup>30</sup> H. Kindler H. Kyanst 2001 – Termodinámica motores – edición alemana cuarta edición [consulta 18 de abril 2012] Pp. 126

PCI = Poder calorífico inferior.

AC = Relación estequiométrica.

En el punto (2) se produce el encendido de la mezcla y por tanto, la combustión a volumen constante (isocórica 2-3), con aportación de calor procedente del combustible, el cual eleva considerablemente la presión y la temperatura interna. De esta forma, al final de la combustión se obtienen presiones del orden de 40 a 70 kg/cm<sup>2</sup> y temperaturas por encima de los 2273 K.<sup>32</sup>

Terminada la combustión en este punto, la presión interna produce el desplazamiento del pistón (3-4), la presión baja progresivamente hasta el punto 4 al aumentar el volumen durante la fase de trabajo. Durante este recorrido, es considerado también teóricamente adiabático (sin pérdidas de calor), la temperatura cedida entre ambos puntos se ha transformado en trabajo gastado para desplazar el émbolo.

En el punto 4 al final del recorrido, se mantiene una presión por encima de la atmosférica (entre 4 y 5 kg/cm<sup>2</sup>) ya que en el cilindro están todavía los gases residuales incandescentes procedentes de la combustión, con temperaturas próximas a los 1273 K.

#### PUNTO 4

PUNTO 4			
	Nafta	Hidrógeno	Mezcla
Temperatura (K)	904.974	883.657	834.844
Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	1.8609	1.8170	1.7176
Entropía (kJ/kg)	938.513	23.782	-236.4149
Entalpía (kJ/kg)	2.8547	159.8104	350.5225
Energía (kJ/kg)	678.7330	17.407	120.0049

Tabla 2.12 Resultados del punto 4 del ciclo de trabajo

<sup>31</sup> Deutsche Gesellschaft (GTZ) 2001– Termodinámica aplicada para la técnica del automóvil – Versión española octava edición [consulta 18 de abril 2012] Pp. 109

<sup>32</sup> ANGEL SAENZ GONZALEZ 2003, Tecnología de la Automoción 4, cuarta edición. [consulta 16 de abril 2012] Pp. 21

Finalizada la carrera de expansión (punto 4), se abre la válvula de escape, a través de la cual salen al exterior los gases residuales, que escapan velozmente debido a la presión interna hasta que esta se iguala a la presión atmosférica (isocórica realizada teóricamente a volumen constante). El calor residual que no se ha transformado en trabajo es cedido a la atmósfera.

La temperatura en el punto 4 se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$T4 = \frac{T3}{Rc^{\alpha-1}} \quad 33$$

Se determina la presión 4 con la siguiente ecuación:

$$P4 = \frac{P3 \cdot T4}{T3 \cdot Rc} \quad 34$$

## 2.3 Diagramas de trabajo teórico, práctico. (Procesos adiabáticos, entropías, entalpías)

### 2.3.1 Diagramas de trabajo teórico, práctico

*“Cuando al ciclo ideal se le elimina todas las reversibilidades y complejidades internas, se finaliza con un ciclo que se asemeja en gran medida al ciclo **real** pero conformado por completo de procesos internamente reversibles, un ciclo con tales características recibe el nombre de ideal.”<sup>35</sup>*

La diferencia de forma consiste en un perfil distinto en las curvas de expansión y compresión, en la sustitución de los trazos rectilíneos de introducción y sustracción del calor por trazos curvos y el redondeamiento de los ángulos agudos. Las causas de tales diferencias se dan por las siguientes razones:

<sup>33</sup> ANGEL SAENZ GONZALEZ 2003, Tecnología de la Automoción cuarta edición. [Consulta 17 de abril 2012]. Pp. 20

<sup>34</sup> ANGEL SAENZ GONZALES - 2000. Tecnología de la automoción. Edición cuarta. . [Consulta 18 de abril 2012]. Pp. 21– 22

<sup>35</sup> YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2007 – Termodinámica – University of Nevada, North Carolina State University – cuarta edición. [consulta 19 de abril 2012] Pp. 440

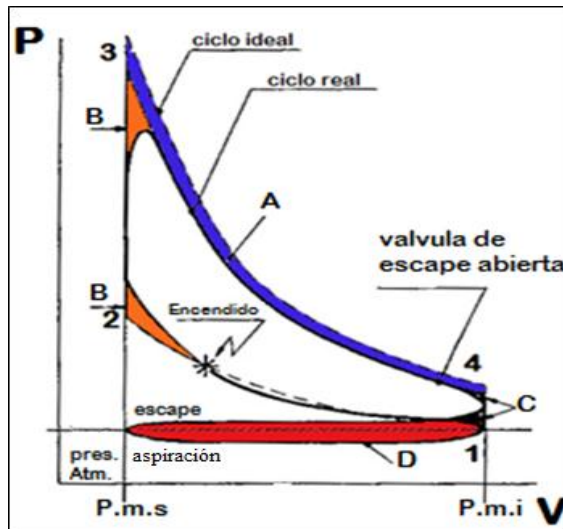


Fig. 2.2 Ciclo de trabajo ideal y real  
 Fuente: DEMOTOR.COM.2009.Ciclos teóricos y ciclos reales [en línea]  
[http://www.demotor.net/ciclos\\_reales/diferencia\\_entre\\_los\\_ciclos\\_otto\\_real\\_y\\_teorico.html](http://www.demotor.net/ciclos_reales/diferencia_entre_los_ciclos_otto_real_y_teorico.html).  
 [Consulta 26 de Mayo 2012]

### 2.3.1.1 Pérdidas de calor

En el ciclo ideal son nulas, pero bastante sensibles, pero en el ciclo real como el cilindro está refrigerado para asegurar el buen funcionamiento del pistón, una cierta parte de calor del fluido se transmite a las paredes. Las líneas de compresión y expansión no son adiabáticas sino politrópicas.

### 2.3.1.2 Combustión no instantánea

En el ciclo ideal, se supone que la combustión se realiza a volumen constante, por tanto, es instantánea. En el ciclo real la combustión dura un cierto tiempo. Si el encendido tuviera lugar justamente en el P.M.S la combustión ocurriría mientras el pistón se aleja de dicho punto, y el valor de la presión sería inferior al previsto. Por ello, es necesario anticipar el encendido de forma que la combustión pueda tener lugar, en su mayor parte, cuando el pistón se encuentra en la proximidad del P.M.S. Esto produce un redondeamiento de la línea teórica 2-3 de introducción del calor y, por tanto, una pérdida de trabajo útil representada por el área B. Pero esta pérdida resulta de cuantía bastante menor de la que se tendría sin adelantar el encendido.

### 2.3.1.3 Tiempo de apertura de la válvula de escape

En el ciclo ideal también habíamos supuesto que la sustracción de calor ocurría instantáneamente en el P.M.I. En el ciclo real la sustracción de calor tiene lugar en un tiempo a que una parte de los gases salgan del cilindro antes de que el pistón alcance el P.M.I. de manera que su presión descienda a valores cercanos de la presión exterior al comienzo de la carrera de expulsión. Este hecho provoca una pérdida de trabajo útil representada por el área C, pérdida que es, sin embargo, menor que la que se tendría sin el adelanto de la apertura de la válvula de escape.

### 2.3.1.4 Aumento de los calores específicos del fluido con la temperatura

*“Se define  $C_v$  como el cambio de energía interna de una sustancia por grado de cambio en su temperatura a volumen constante.  $C_p$  se define como el cambio de la entalpía de una sustancia por grado de cambio en su temperatura a presión constante.”*<sup>36</sup>

En un gas real que crece con la temperatura, de tal forma que su diferencia permanece constante, es decir,

$$C_p - C_v = R$$

Por consiguiente, al aumentar la temperatura disminuye el valor de la relación de calores específicos del aire a temperatura ambiente

$$k = C_p / C_v$$

En el ciclo real los productos de la combustión tienen calores específicos mayores que el aire, por tanto, los valores de la presión y de la temperatura máxima, son inferiores al ciclo ideal. Por esta razón, la superficie y el rendimiento térmico resultan disminuidos.

---

<sup>36</sup> YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2007 – Termodinámica – University of Nevada, North Carolina State University – Quinta edición. [consulta 18de abril 2012] Pp. 99

*“La eficiencia térmica de un ciclo Otto ideal depende de la relación de compresión de la máquina y de la relación de calores específicos del fluido de trabajo (si es diferente del aire). La eficiencia térmica del ciclo Otto ideal aumenta tanto con la relación de compresión como con la relación de calores específicos.”<sup>37</sup>*

### 2.3.1.5 Disociación en la combustión

Los productos de la combustión son esencialmente CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, además de otros compuestos, tales como CO, H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. La disociación de estos productos es una reacción que se lleva a cabo con la absorción de calor. La temperatura máxima alcanzable es menor y se pierde una cierta cantidad de trabajo. Pero dado que la temperatura disminuye durante la expansión, se produce un retroceso en la reacción de disociación. En esta fase se produce un parcial desarrollo de calor. El ciclo real presenta, por último, otra diferencia importante al compararlo con el ciclo ideal; durante la carrera de aspiración, la presión en el cilindro es inferior a la que se tiene durante la carrera de escape. Salvo casos particulares, en el curso de la aspiración, la presión resulta inferior a la atmosférica, mientras que durante el escape es superior.

### 2.3.2 Procesos adiabáticos

*“En el proceso adiabático, las magnitudes como la presión o el volumen se modifican sin una transferencia significativa de energía calorífica hacia el entorno o desde éste.”<sup>38</sup>* El calentamiento y enfriamiento adiabático estos procesos generalmente ocurren debido al cambio en la presión de un gas. Esto puede ser estudiado a través de la ley de los gases ideales.

$$Pv = RT$$

<sup>37</sup> YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2007, Termodinámica, Mac Graw Hill, México, 2001[consulta 20de abril 2012] Pp. 448

<sup>38</sup> LENNTECH. 2011. Termodinámica [en línea]. España. <<http://www.alegsa.com.ar/definición/de/termodinámica.php>> [consulta 27 de abril de 2012]

<sup>39</sup> YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2007, Termodinámica, Mac Graw Hill, México, 2001[consulta 20de abril 2012] Pp. 99

Un gas al dilatarse adiabáticamente se enfría, pues la cantidad de calor que contiene se reparte en un volumen mayor. Al contrario sucede con la compresión adiabática de dicho gas: tiene por efecto un aumento de su temperatura. Si tomamos entre ejes la ordenada a la presión del gas y en la abscisa el volumen que ocupa en el interior del cilindro, se dice que dicho gas no recibe ni cede ningún calor exterior al sistema, entonces obtenemos un punto representativo. Modificando progresivamente la presión lograra una sucesión de puntos, formando una curva adiabática característica. Estas curvas representan un importante papel en termodinámica. Los valores de la presión de la tabla se encuentran a una escala de 1:5

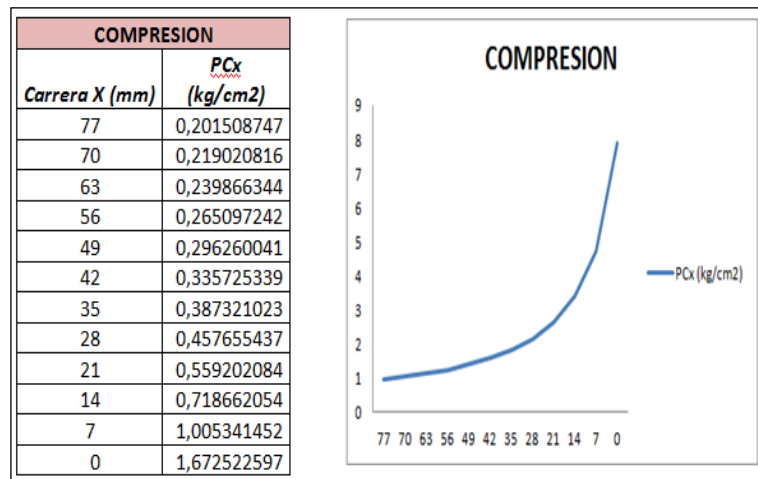


Fig. 2.3 Curva de compresión en función del recorrido del pistón

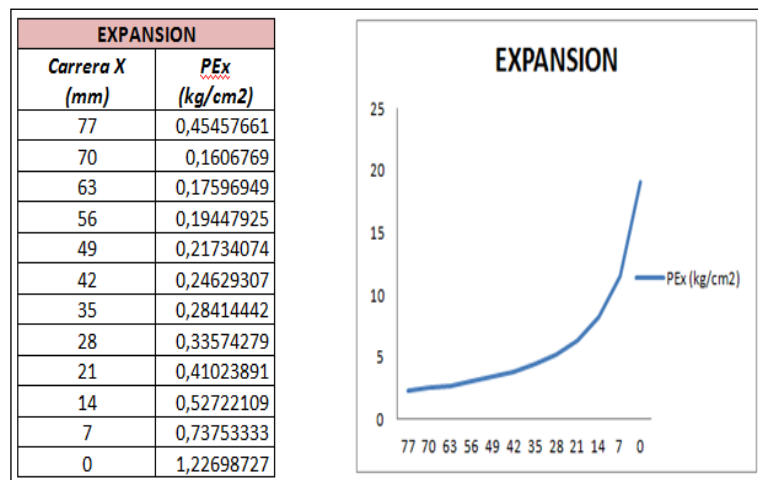


Fig. 2.4 Curva de expansión en función del recorrido del pistón

### 2.3.3 Entropías

*“Entropía es una medida del desorden molecular o aleatorio molecular. Conforme un sistema se vuelve más desordenado, las posiciones de las moléculas son menos predecibles y aumentan la entropía. Por ello no sorprende que la entropía de una sustancia sea más baja en la fase salida y más alta en la fase gaseosa.”<sup>40</sup>*

Un proceso isoentrópico a entropía constante o adiabático, es un proceso que sirve de referencia simplificada e idealizada para los procesos de compresión y expansión en los motores de combustión interna, donde se asume que a las velocidades con que efectúan estos procesos no hay tiempo suficiente para el intercambio del calor.

En un proceso isoentrópico sobre un diagrama (entropía y temperatura) se reconoce fácilmente como un segmento de línea vertical, puesto que un proceso isoentrópico no implica transferencia de calor.

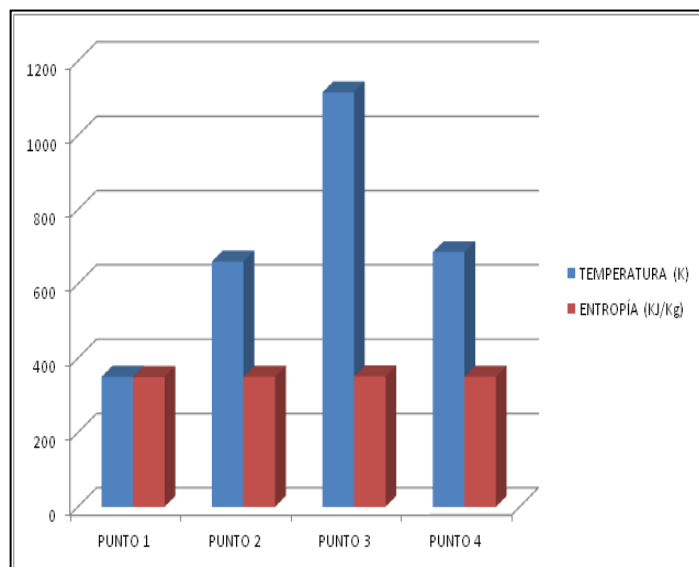


Fig. 2.5 Valores de entropía y temperatura en cada punto del ciclo sistema mixto.

<sup>40</sup> YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2007, Termodinámica, Mac Graw Hill, México, 2001[consulta 12de abril 2012] Pp. 311



### 2.3.4 Entalpías

*“Estudia los cambios en la energía de un sistema durante un proceso y no en los valores de la energía en los estados de referencia, y asigna un valor de cero a la energía interna o entalpía de una sustancia en ese estado”<sup>41</sup>*

En los procesos de combustión la entalpía de reacción se conoce como la entalpía de combustión, la cual representa la cantidad de calor liberada durante un proceso de combustión de flujo estable cuando 1Kmol (1kg) de combustible se quema por completo a una temperatura y presión especificada.

Si un proceso de combustión no implica cambios químicos en su composición, el estado de referencia no es valorado. Cuando existe un cambio en la composición química es un estado de referencia a elegir en condiciones estándares, es decir a una presión de 1 atmósfera y a 288 K. Esta condición es conocida como estado de referencia estándar.

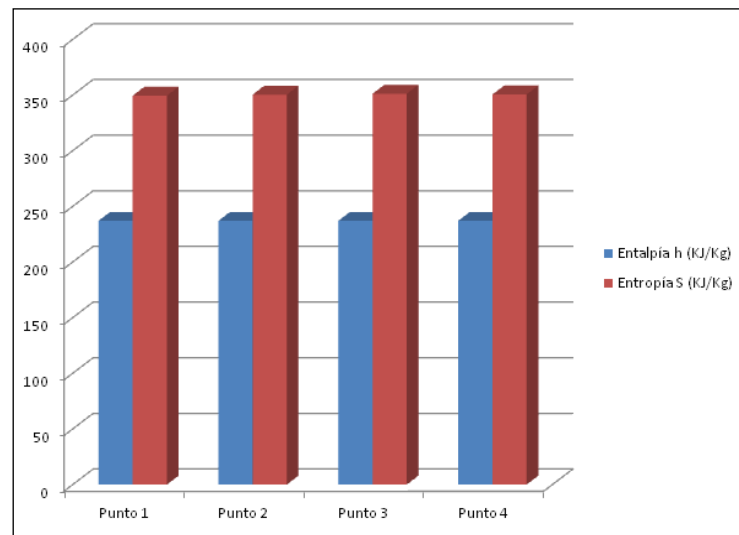


Fig. 2.6 Valores de entropía y entalpía en cada punto del ciclo en el sistema mixto

<sup>41</sup> YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2001 – Termodinámica – University of Nevada, North Carolina State University – cuarta edición. [consulta 18de abril 2012] Pp. 691

## 2.4 Modificación de los diagramas ocasionado por la presencia de hidrógeno.

Dentro de los puntos importantes a considerar en un ciclo Otto simple o sistema mixto, es la presión y la temperatura de cada uno de los puntos, así como la eficiencia mecánica, la misma que nos revelará la eficiencia del sistema.

<b>PUNTO 1:</b>	
<i>Temperatura (K)</i>	<i>Presión de admisión (kPa)</i>
350	70.60770593
<b>PUNTO 2:</b>	
<i>Temperatura (K)</i>	<i>Presión de compresión (kPa)</i>
689.222	1153.543589
<b>PUNTO 3:</b>	
<i>Temperatura (K)</i>	<i>Presión de expansión (kPa)</i>
1472.39	2464.336423
<b>PUNTO 4:</b>	
<i>Temperatura (K)</i>	<i>Presión de escape (kPa)</i>
904.974	182.4915

Tabla 2.13 Resultado de temperaturas y presiones en diferentes puntos del ciclo funcionando con nafta

De la Tabla 2.13 se puede acotar que en el punto 3 la temperatura asciende a 1472.39 K y la presión a 2464,33 kPa, lo cual sugiere que la relación aire combustible está siendo obtenida de manera adecuada y el motor no será perjudicado. En cuanto a la eficiencia (tabla 2.35) se demuestra que el sistema está funcionando correctamente, ya que el valor de la misma se mantiene en un rango verosímil de datos.

Una mezcla adecuada entre el hidrógeno y la nafta permite observar que aunque la temperatura tiende a tratar de igualar al ciclo Otto a base de nafta, las presiones son bajas por lo tanto la eficiencia (tabla 2.36) del ciclo en sí descenderá. Además, para poder alargar la vida útil del motor se debe considerar que la presión excesiva y temperaturas elevadas no son recomendables.

PUNTO 1:	
Temperatura (K)	Presión de admisión (kPa)
350	70.60770593
PUNTO 2:	
Temperatura (K)	Presión de compresión (kPa)
660.939	1106.20700
PUNTO 3:	
Temperatura (K)	Presión de expansión (kPa)
1365.32	2285.130143
PUNTO 4:	
Temperatura (K)	Presión de escape (kPa)
839.164	169.2133

Tabla 2.14 Resultado de temperaturas y presiones en diferentes puntos del ciclo funcionando con nafta – hidrógeno al 5%

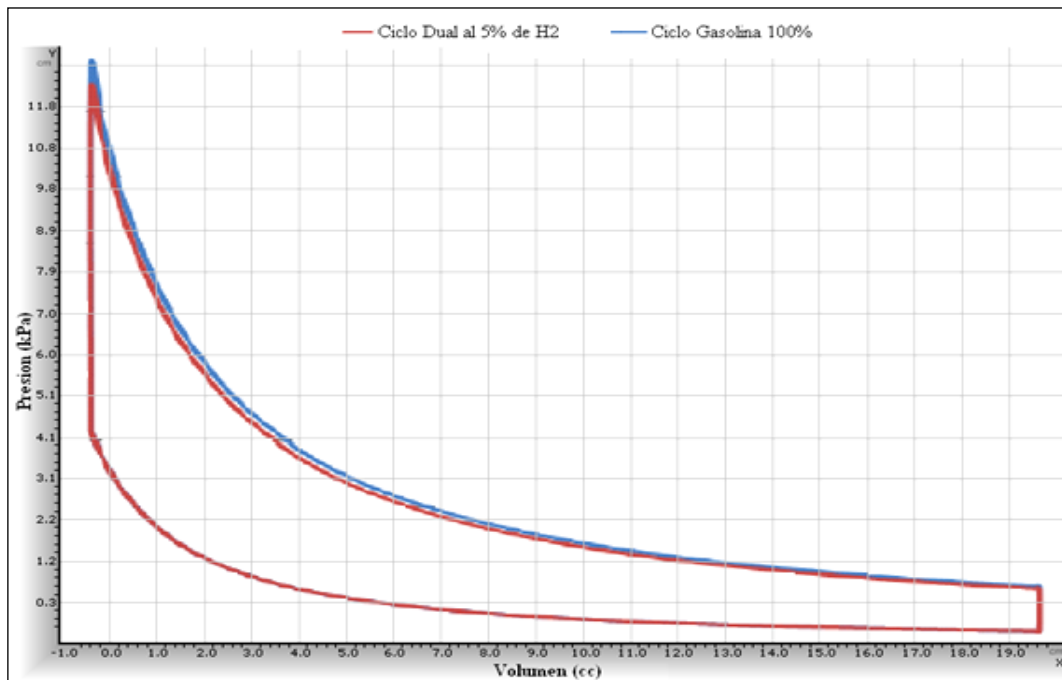


Fig. 2.7. Modificación del diagrama presión, volumen al 5 % hidrógeno

Comparando valores con los cálculos realizados, se puede afirmar que el porcentaje adecuado para una relación aire combustible así como para presiones y temperaturas que no afecten la vida útil del motor es emplear un 2% de hidrógeno en un sistema mixto, para confirmar esta aseveración se indican valores de presión y temperatura en la siguiente tabla, así como la eficiencia de la tabla 2.37.

PUNTO 1:	
Temperatura (K)	Presión de admisión (kPa)
350	70.60770593
PUNTO 2:	
Temperatura (K)	Presión de compresión (kPa)
660.6593	1105.74
PUNTO 3:	
Temperatura (K)	Presión de expansión (kPa)
1384.74	2317.63
PUNTO 4:	
Temperatura (K)	Presión de escape (kPa)
851.1	171.624

Tabla 2.15 Resultado de temperaturas y presiones en diferentes puntos del ciclo funcionando con nafta – hidrógeno al 2%

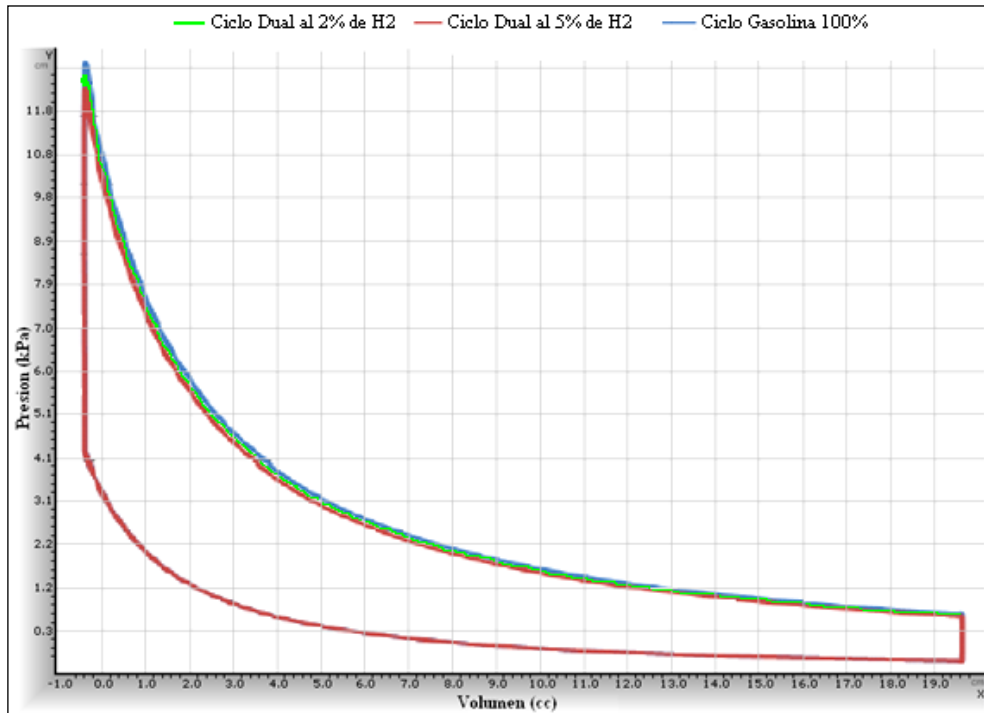


Fig. 2.8. Modificación del diagrama presión, volumen al 2 % hidrógeno

% H2	T1 (K)	P1 (kPa)	T2 (K)	P2 (kPa)	T3 (K)	P3 (kPa)	T4 (K)	P4 (kPa)	AC
2	350.15	70.60771	660.6593	1105.74153	1384.74	2317.63	851.1	171.624	15.09
4	350.15	70.60771	660.7991	1105.97556	1371.63	2295.69	843.04	169.999	15.39
5	350.15	70.60771	660.9390	1106.20964	1365.32	2285.13	839.164	169.217	15.54
6	350.15	70.60771	661.0789	1106.44376	1359.13	2274.77	835.359	168.450	15.69
8	350.15	70.60771	661.2188	1106.67794	1346.94	2254.37	827.869	166.940	15.99
10	350.15	70.60771	661.3587	1106.91217	1335.19	2234.69	820.643	165.482	16.29

Tabla 2.16 Resultados de temperaturas y presiones en diferentes puntos del ciclo funcionando con nafta – hidrógeno en diferentes porcentajes

## 2.5 Estudio de la relación estequiométrica óptima empleando nafta e hidrógeno

Aunque los combustibles hidrocarburos líquidos son mezclas de muchos hidrocarburos diferentes, por conveniencia suelen considerarse como un solo hidrocarburo. Por ejemplo, la nafta se trata como octano  $C_8H_{18}$ .<sup>42</sup>

Para obtener la relación estequiométrica es necesario partir de la ecuación de reacción debidamente balanceada. En una tabla periódica de los elementos obtenemos los valores de masa atómica para cada uno de los elementos que intervienen en la reacción, y empleamos la siguiente ecuación:

$$AC = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}}$$

AC: Relación estequiométrica

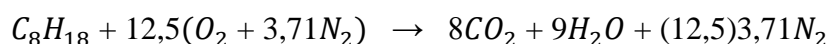
*“Las masas que intervienen en la ecuación se obtienen multiplicando el número de átomos de cada elemento por su masa atómica. Luego se suman estos productos para cada molécula.”<sup>43</sup>*

<sup>42</sup> YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2003, Termodinámica, Combustibles y combustión [consulta 22de abril 2012] Pp. 682

Para el presente análisis, hemos considerado únicamente los dos principales elementos que forman el aire: el nitrógeno (78%) y el oxígeno (21%), omitiendo el restante 1% correspondiente a otros gases presentes en el aire.

Es importante citar que para el análisis es necesario considerar que en la composición teórica del aire (78% de  $N_2$  y 21% de  $O_2$ ), están presentes 3,71 átomos de  $N_2$  por cada átomo de  $O_2$ , valor obtenido al dividir el porcentaje correspondiente al nitrógeno para el de oxígeno.

### 2.5.1 Empleando nafta:



Las masas atómicas de cada elemento son las siguientes:

C: 12,0112

H: 1,0080

O: 15,9994

N: 14,0067

Entonces tenemos la siguiente ecuación:

$$AC = \frac{m \ 12,5(O_2 + 3,71N_2)}{m (C_8H_{18})}$$

$$AC = \frac{12,5(2)(15,9994) + 3,71(12,5)(2)(14,0067)}{8(12,0112) + 18(1,0080)}$$

$$AC = 14.8740:1$$

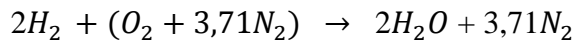
---

<sup>43</sup> ARMENDARIS 2005, QUIMICA GENERAL MODERNA, Nueva edición revisada [consulta 22de abril 2012] Pp.171

NAFTA		
	REACTIVOS	PRODUCTOS
Número de moles total (kmol)		
yi O2	0.21	----
yi N2	0.78	0.73
<b>yi H2O</b>	----	0.14
yi CO2	----	0.13
Mm O2 (kg/kmol)	31.99	31.99
Mm N2 (kg/kmol)	28.01	28.01
Mm H2O (kg/kmol)	18.02	18.02
Mm CO2 (kg/kmol)	----	44.01
Relación aire-combustible AC	14.874:1	

Tabla 2.17 Masas y fracciones molares de los reactivos y productos para la nafta

**2.5.2 Empleando hidrógeno:**



$$AC = \frac{m(O_2 + 3,71N_2)}{m(2)(H_2)}$$

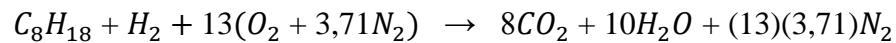
$$AC = \frac{(2)(15,9994) + 3,71(2)(14,0067)}{2(2)(1,0080)}$$

$$AC = 33.7124:1$$

HIDROGENO		
	REACTIVOS	PRODUCTOS
Numero de moles total (kmol)		
yi O2	0.15	----
yi N2	0.55	0.65
<b>yi H2O</b>	----	0.35
yi H2	0.30	----
Mm O2 (kg/kmol)	31.99	31.99
Mm N2 (kg/kmol)	28.01	28.01
Mm H2O (kg/kmol)	18.02	18.02
Mm H2 (kg/kmol)	2.016	----
Relación aire-combustible AC	33.712:1	

Tabla 2.18 Masas y fracciones molares de los reactivos y productos para el hidrógeno

### 2.5.3 Empleando un combustible mixto:



$$AC = \frac{m(13)(O_2 + 3,71N_2)}{m[(H_2) + C_8H_{18}]}$$

$$AC = \frac{(13)[(15,9994)(2) + 3,71(2)(14,0067)]}{2(1,0080) + 8(12,0112) + 18(1,0080)}$$

$$AC = 15.2007:1$$

SISTEMA MIXTO		
	REACTIVOS	PRODUCTOS
Número de moles total (kmol)		
yi O2	0.21	----
yi N2	0.76	0.73
<b>yi H2O</b>	----	0.14
yi H2	0.02	----
yi CO2	----	0.13
Mm O2 (kg/kmol)	31.99	31.99
Mm N2 (kg/kmol)	28.01	28.01
Mm H2O (kg/kmol)	18.02	18.02
Mm H2 (kg/kmol)	2.016	
Mm CO2 (kg/kmol)	----	44.01
Relación aire-combustible AC	15.2007:1	

Tabla 2.19 Masas y fracciones molares de los reactivos y productos para el sistema mixto

## 2.6 Demostración matemática de la factibilidad del proyecto (trabajo, potencia, energía, rendimiento térmico, rendimiento mecánico, eficiencia)

### 2.6.1 Trabajo

El trabajo es la transferencia de energía asociada con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia. Tanto el calor como el trabajo, requieren de la especificación de su magnitud como de su dirección. Una forma de hacer esto es adoptando un signo convencional, es decir:



*“La transferencia de calor hacia un sistema y el trabajo hecho por un sistema son positivos; la transferencia de calor desde un sistema y el trabajo hecho sobre un sistema son negativos.”<sup>44</sup>*

Para calcular el trabajo neto del ciclo (W neto) partimos de los valores obtenidos del calor de entrada (Q entrada) y el calor de salida (Q salida), a través de la siguiente ecuación:

$$W \text{ neto} = Q \text{ entrada} - Q \text{ salida} \quad \text{kJ}$$

Calor emitido (Qsal) (kJ/kg)	Calor de entrada (Qen) (kJ/kg)	Trabajo neto (Wneto) (kJ/kg)
396.264	681.826	285.563

Tabla 2.20 Trabajo neto (Wneto) nafta

Calor emitido (Qsal) (kJ/kg)	Calor de entrada (Qen) (kJ/kg)	Trabajo neto (Wneto) (kJ/kg)
10.450	1163.236	1152.786

Tabla 2.21 Trabajo neto (Wneto) hidrógeno

% H2 en la reacción	Calor emitido (Qsal) (kJ/kg)	Calor de entrada (Qen) (kJ/kg)	Trabajo neto (Wneto) (kJ/kg)
2	211.34	318.345	107.45
4	418.35	630.46	215.87
5	499.67	783.87	284.45
6	596.46	907.23	311.34
8	789.87	1199.34	499.98
10	978.34	1485.56	564.46

Tabla 2.22 Trabajo neto (Wneto) sistema mixto

<sup>44</sup> YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2003, Termodinámica, cuarta edición. [consulta 22de abril 2012] Pp. 124 – 125

### 2.6.2 Potencia

La potencia es la cantidad de trabajo que se realiza por unidad de tiempo. Puede asociarse a la velocidad de un cambio de energía dentro de un sistema, o al tiempo que demora la concreción de un trabajo. La potencia está en función de la presión media efectiva, el volumen total y las revoluciones máximas que proporcionan el motor a determinarse.

$$N = \frac{Pme \cdot Vt \cdot n}{900} \quad \text{CV}$$

N = Potencia (CV)

Pme = Presión media efectiva ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

Vt = Volumen total (l)

n = Revoluciones por minuto (rpm)

PME ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Vt ( $\text{cm}^3$ )	n (rpm)	N (CV)
8.626	993	5000	47.922

Tabla 2.23 Potencia empleando nafta

PME ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Vt ( $\text{cm}^3$ )	n (rpm)	N (CV)
24.60	993	5000	136.66

Tabla 2.24 Potencia empleando hidrógeno

% H <sub>2</sub>	PME ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Vt ( $\text{cm}^3$ )	n (rpm)	N (CV)
2	8.923	993	5000	49.572
4	9.264	993	5000	51.467
5	9.492	993	5000	52.733
6	9.625	993	5000	53.472
8	10.268	993	5000	57.044
10	10.710	993	5000	59.500

Tabla 2.25 Potencia empleando diferentes porcentajes de hidrógeno

### 2.6.3 Energía

La energía ( $u$ ) de un gas ideal y los calores específicos de las sustancias incompresibles dependen solamente de la temperatura. Por lo tanto, a una temperatura dada,  $u$ ,  $C_v$  y  $C_p$  de un gas ideal tendrán valores fijos sin importar el volumen o la presión.

Energía $u$ (kJ/kg)	
P1	285.6597
P2	503.840
P3	1179.927
P4	678.7330

Tabla 2.26 Energía en el sistema con nafta

Energía $u$ (kJ/kg)	
P1	6.95747
P2	16.694
P3	1185.968
P4	17.407

Tabla 2.27 Energía en el sistema con hidrógeno

P3 Punto crítico	
% H <sub>2</sub>	Energía $u$ (kJ/kg)
2	123.5748313
4	121.6435872
5	120.6758317
6	119.6786388
8	117.7269664
10	115.7701768

Tabla 2.28 Energía en el sistema con diferentes porcentajes de hidrógeno

### 2.6.4 Rendimiento Térmico

En las máquinas térmicas la salida deseada es la del trabajo neto, y la entrada requerida es la cantidad de calor suministrado al fluido de trabajo. En este caso el rendimiento térmico ( $\eta_t$ )\* es considerado como Isotérmico (temperatura constante) se expresa como:

$$\eta_t = \frac{W \text{ neto}}{Q \text{ entrada}} \quad \%$$

Existe a su vez un rendimiento térmico considerado como isobárico (Presión constante), es decir, que el aprovechamiento de la energía en los motores, es tanto mayor cuanto más elevada es la relación de compresión utilizada.

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{R_c^{k-1}} \quad \%$$

$\eta_t$  = Rendimiento térmico

$R_c$  = Relación de compresión

$k$  = Relación de calores específicos

La eficiencia térmica de una máquina de encendido de chispa real será menor que la de un ciclo Otto ideal debido a las irreversibilidades como la fricción, combustión incompleta, etc. La eficiencia térmica de una máquina de encendido de chispa real varía aproximadamente 25 a 30%.

Rendimiento térmico ( $\eta_t$ ) (%)	Rendimiento térmico ( $\eta_t$ ) (%)
41.882	57.11

Tabla 2.29 Los rendimientos térmicos obtenidos con nafta

Rendimiento térmico ( $\eta_t$ ) (%)	Rendimiento térmico ( $\eta_t$ ) (%)
49.553	57.56

Tabla 2.30 Los rendimientos térmicos obtenidos con hidrógeno

% H <sub>2</sub>	Rendimiento térmico ( <i>nt</i> ) (%)	Rendimiento térmico ( <i>nt</i> ) (%)
2	33.706	37.82
4	33.606	37.82
5	36.304	37.82
6	34.293	37.82
8	34.202	37.82
10	34.112	37.82

Tabla 2.31 Los rendimientos térmicos con diferentes porcentajes de hidrógeno

### 2.6.5 Rendimiento mecánico

El rendimiento mecánico en una máquina térmica es la relación entre los calores obtenidos que varían por las temperaturas en los diferentes puntos del ciclo de trabajo (fig 2.2).

$$n = 1 - \frac{\text{Calor emitido } Q_{sal}}{\text{Calor ingresado } Q_{en}} \quad \%$$

Calor emitido (Qsal) (kJ/kg)	Calor de entrada (Qen) (kJ/kg)	Rendimiento Mecánico (%)
396.264	681.826	41.88

Tabla 2.32 Rendimiento mecánico obtenidos con nafta

Calor emitido (Qsal) (kJ/kg)	Calor de entrada (Qen) (kJ/kg)	Rendimiento Mecánico (%)
10.450	34.896	29.94

Tabla 2.33 Rendimiento mecánico obtenidos con hidrógeno

% H2 en la reacción	Calor emitido (Qsal) (kJ/kg)	Calor de entrada (Qen) (kJ/kg)	Rendimiento Mecánico (%)
2	0.211	0.318	33.64
4	0.418	0.630	33.65
5	0.499	0.783	36.27
6	0.596	0.907	34.28
8	0.789	1.199	29.49
10	0.978	1.485	34.14

Tabla 2.34 Rendimiento mecánico con diferentes porcentajes de hidrógeno

### 2.6.6 Eficiencia del ciclo

La eficiencia del ciclo con combustible nafta es mayor que un sistema mixto. Esto se produce porque al introducir un mayor porcentaje de hidrógeno, las temperaturas descienden (apartado 2.4), reduciendo el excesivo desgaste en las piezas del motor, alargando su vida útil.

RESULTADOS
<b>Eficiencia del ciclo (<math>\eta</math>) (%)</b>
41.861

Tabla 2.35 Eficiencia del ciclo con nafta

RESULTADOS
<b>Eficiencia del ciclo (<math>\eta</math>) (%)</b>
36.304

Tabla 2.36 Eficiencia del ciclo con 2% hidrógeno

RESULTADOS
<b>Eficiencia del ciclo (<math>\eta</math>) (%)</b>
33.71

Tabla 2.37 Eficiencia del ciclo con 5% de hidrógeno

## **Conclusiones**

En este capítulo verificamos que el proyecto de implementar un sistema de alimentación de hidrógeno como combustible complementario es posible, debido a que las condiciones de trabajo del motor no se ven afectadas. A través de la termodinámica se ha hecho un cálculo de la modificación de las prestaciones del motor, como potencia, trabajo, energía, rendimientos y eficiencias.

En base a los resultados obtenidos en los cálculos, podemos establecer ciertas normas de seguridad, con el objetivo de que la construcción del generador y su posterior funcionamiento, se lo haga de manera segura y eficiente.

## CAPITULO III

### DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA INSTALACION DEL SISTEMA DE HIDROGENO

Luego de realizados los estudios termodinámicos concernientes al empleo del hidrógeno como combustible, en el presente capítulo nos enfocamos en el estudio de los elementos constitutivos del sistema. Iniciamos con el generador electrolítico como parte fundamental. Analizamos su constitución interna y externa, materiales, componentes y construcción, luego el depósito, el atrapa llama y los elementos del sistema eléctrico. Realizamos el montaje del conjunto en el vehículo y las calibraciones del sistema, como la regulación de la corriente de entrada, la proporción del electrolito, realizamos pruebas de estanqueidad y de rendimiento.

#### 3.1 Esquema del circuito de alimentación de hidrógeno

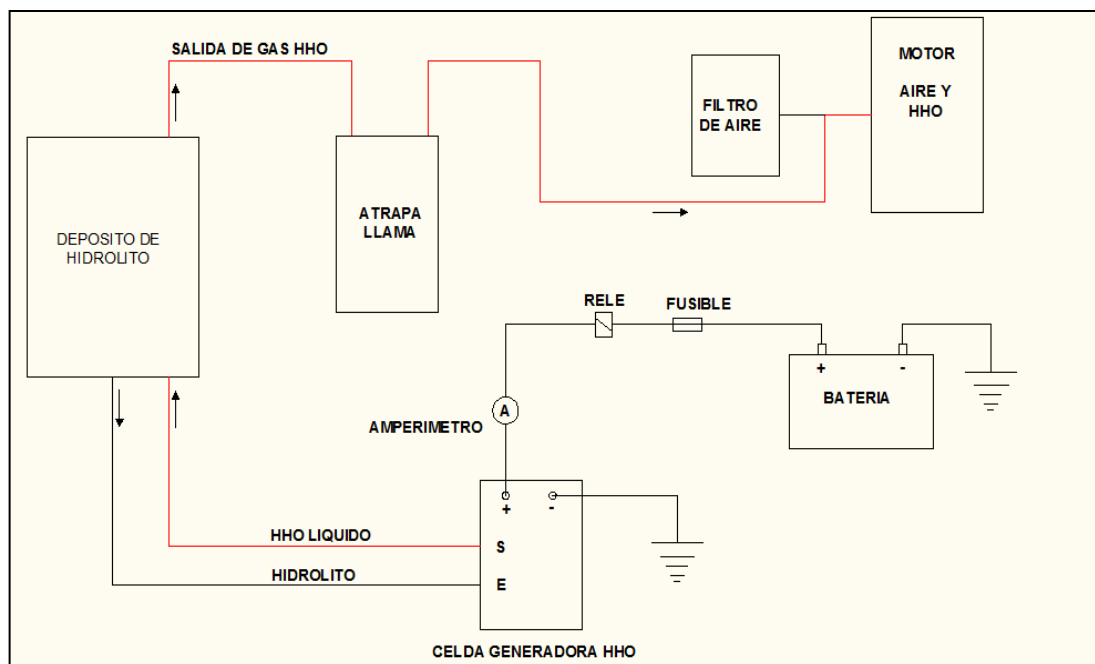


Fig.3.1. Esquema general de la conexión con cañerías y cables para un vehículo a carburador



## 3.2 Diseño y construcción de los elementos constitutivos

### 3.2.1 Generador de hidrógeno electrolítico

Es en el interior del generador donde se producirá la reacción química de descomposición de la molécula del agua ( $H_2O$ ) en hidrógeno gaseoso ( $H_2$ ) y oxígeno gaseoso ( $O_2$ ). Consta de un determinado número de placas y cauchos aislantes que conformarán las celdas.<sup>45</sup> Al aplicar corriente en mayor o menor medida, se produce la electrólisis. Todo conjunto de celdas debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Pequeño y compacto para facilidad de la instalación en el vehículo.
- Debe ser capaz de producir hidrógeno a través de la electrólisis.
- Que el sistema eléctrico tenga la facilidad de funcionar y cerrar el circuito de una manera segura.
- Que internamente no presente riesgos de contacto entre polos diferentes y se pueda producir incendios o cortos.
- El generador debe ser hermético para evitar fugas de líquido o fugas del hidrógeno producido.
- Los materiales utilizados necesitan cumplir ciertas características en cuanto a calidad y durabilidad para asegurar un óptimo desempeño a cualquier régimen.

#### 3.2.1.1 Constitución del generador

El generador está hecho de 15 placas de acero inoxidable 316L de 1 mm de espesor, divididas entre 4 placas grandes que miden 60 mm por 120 mm y las 11 placas pequeñas de 60 mm por 92 mm. Todas las placas poseen 3 perforaciones, 2 para la circulación del líquido y una central destinada para el paso del perno de sujeción del conjunto. Se colocan entre ellas empaques de caucho reforzado de 2 mm de espesor, considerando que el armado de las celdas se lo debe realizar lo más centrado posible entre placas y empaques, garantizando la hermeticidad del conjunto.

---

<sup>45</sup> ECURED. 2011. Electrolizador para la generación de Hidrógeno. [en línea]. Cuba. <<http://www.ecured.cu/index.php/Co>> [consulta 27 de mayo de 2012]

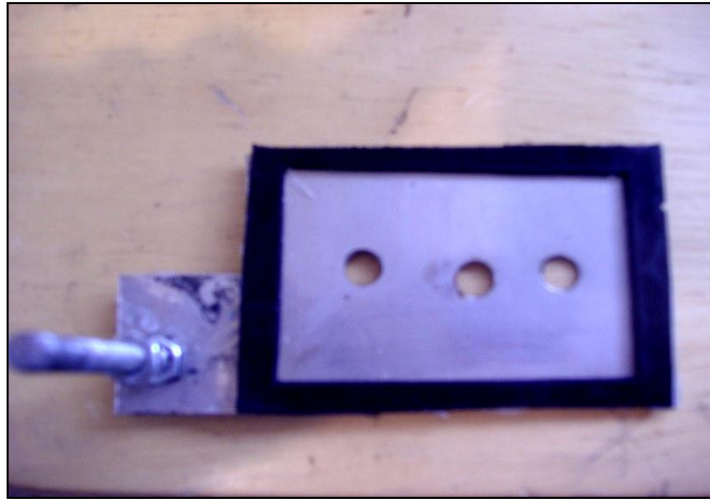


Fig. 3.2 Placas internas y empaques de hule del separador

La configuración que posee la celda es de dos placas positivas y dos negativas, con sus respectivos pernos y tuercas. Las 11 placas restantes son neutras, encontrándose intercaladas de la siguiente manera:  $N + NNN - NNN + NNN - N$ . Esta es la disposición que se seguirá para armar el conjunto.

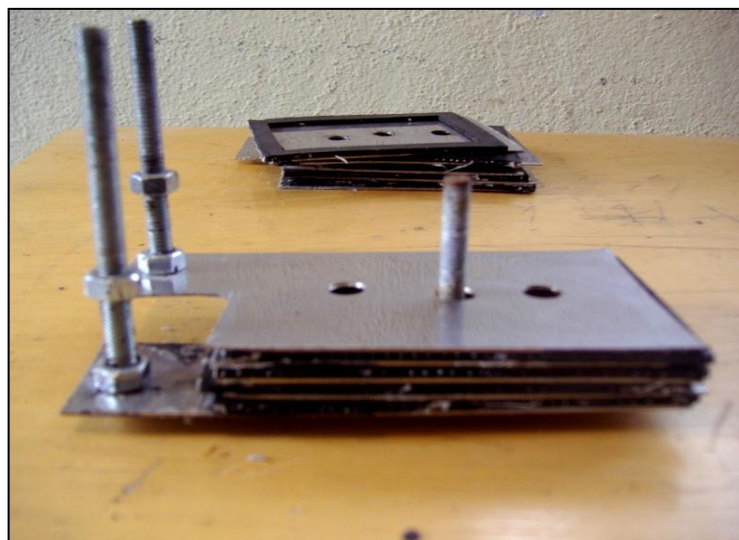


Fig. 3.3 Vista lateral de las placas separadas por juntas de hule

Las conexiones eléctricas al exterior se fijan mediante dos tornillos de acero inoxidable. El primero une a las 2 placas grandes positivas y el segundo a las 2

placas negativas restantes. Cada tornillo está sujeto a las placas mediante tuercas y contratuercas respectivamente.

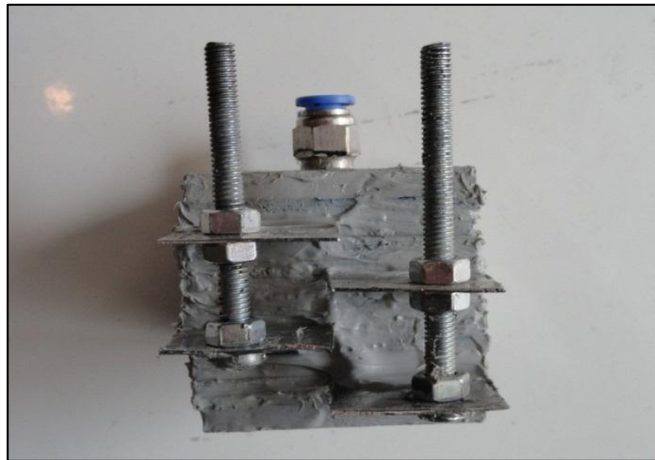


Fig. 3.4 Placas de acero inoxidable con sus terminales eléctricos

Todo el conjunto se une a través de un perno central de acero inoxidable, que en sus extremos tiene distanciadores plásticos necesarios para aislar las placas de diferente polaridad. Para ajustar la presión entre placas se actúa sobre una tuerca que se monta en el extremo del perno.

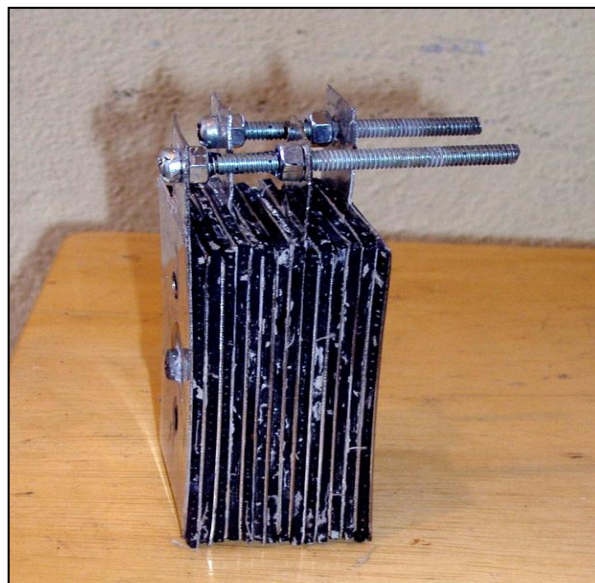


Fig. 3.5 Placas positivas y negativas con sus respectivos terminales

Adicionalmente, se colocó unas tapas con la finalidad de formar un recipiente para que circule la mezcla por todas las celdas alojadas en su interior. En la tapa delantera se colocó unos acoples rápidos que van a ser los encargados de permitir la entrada de la mezcla y la salida del gas hidrógeno.

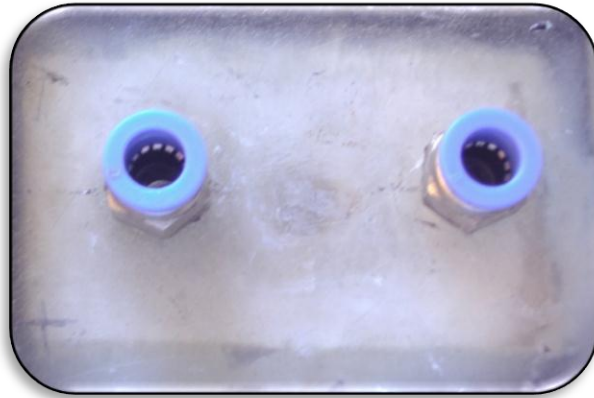


Fig. 3.6 Tapa delantera del grupo separador con sus respectivos acoples rápidos

Para que las tapas queden unidas firmemente nos valemos de una prensa, cubrimos el conjunto con una pega especial para dar mayor hermeticidad. Una vez que se ha esperado el tiempo necesario de secado retiramos de la prensa y procedemos a probarlo introduciendo aire en la entrada y tapando la salida, de esta manera verificamos que no exista ninguna salida de aire por sus lados.

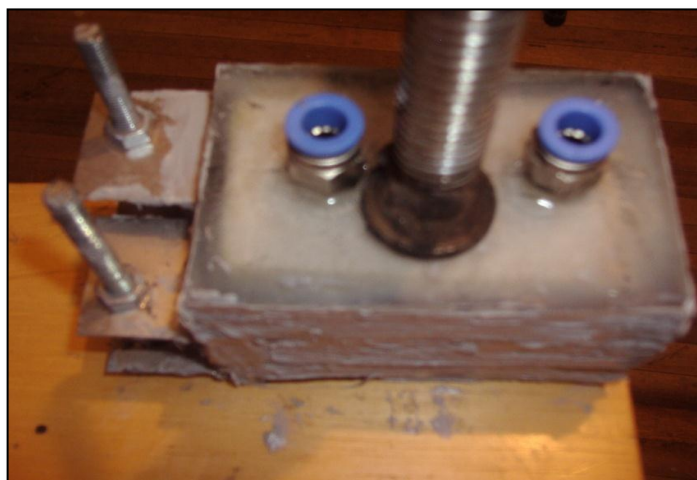


Fig. 3.7 Proceso de armado del grupo de celdas

Debido a su construcción, el conjunto debe trabajar en posición vertical, ya que en la parte inferior ingresa el hidrolito (agua destilada + hidróxido de sodio). Una vez que se produce la electrólisis se obtiene gas hidrógeno, el mismo que sale por la parte superior del generador.

#### **3.2.1.1.1 Placas internas.**

Utilizamos placas de 1 mm de espesor en Acero 316L (acero inoxidable de calidad quirúrgica)<sup>46</sup> por sus beneficios anticorrosivos, auto limpieza y su conductividad eléctrica, ya que se empleará el hidrolito. Por la descomposición de estas sustancias un acero normal no cumple con las condiciones requeridas.

#### **3.2.1.1.2 Preparación de las placas**

Una vez establecidas las medidas de las placas se procedió a cortar la plancha con la ayuda de una cizalla. Luego de realizado el corte de las placas, en las superficies se generan rugosidades propias del proceso de corte, las mismas que deben ser eliminadas mediante el empleo de un limatón. Se recomienda achaflanar las esquinas para evitar cortes al momento de su manipulación. A continuación se muestra el número de placas utilizadas en el generador:

**Total de placas grandes: 4**

**Total de placas pequeñas: 11**

---

<sup>46</sup> UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUNYA. 2009. Propiedades del acero inoxidable. [en línea]. España. <<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/4/55868-4.pdf>> [consulta 1 de junio de 2012]

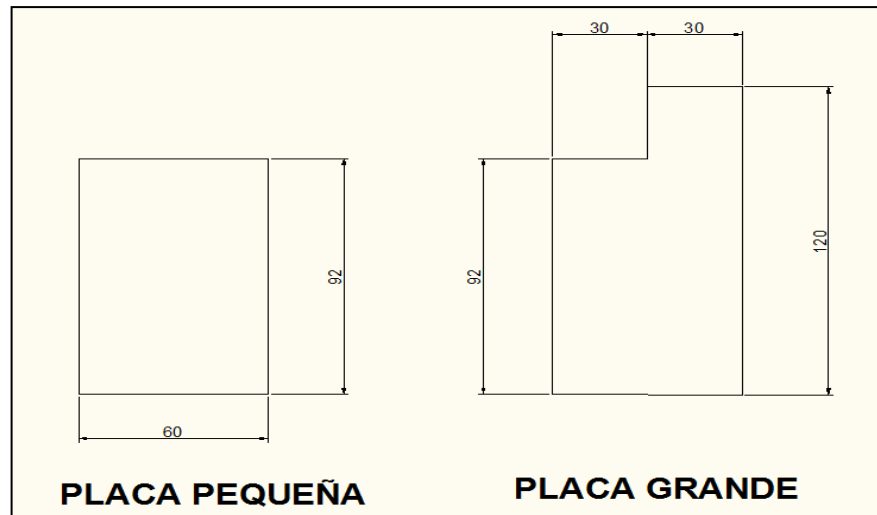


Fig. 3.8 Dimensiones de las placas internas del conjunto separador

Se identifica los lados de 60 mm que se van a utilizar, se mide una distancia de 20 mm de cada extremo, variando entre placas  $\pm 2, 4$  mm, logrando con esto que los orificios no se encuentren alineados y de esta manera la mezcla circule una vez que haya llenado la primera celda y continúe con el progresivo llenado. Con la ayuda de un punto se señala y procedemos a pasar la broca de menor diámetro (3.175 mm), hasta alcanzar el diámetro final de 6,35 mm. Una vez conseguido esto se retira las rebabas con una piedra de esmeril.



Fig. 3.9 Proceso de taladrado de las placas internas

Además, usando un martillo y un punzón realizamos múltiples puntos, debido a que la electricidad circula con mayor facilidad en las zonas de menor superficie, mientras más puntos, conseguimos aumentar la producción de 1.3 l/min, a 1.5 l/min. Es también importante que después de este punzonado se retire de las placas las impurezas grandes con una lija muy gruesa, para luego someterlas a un completo y cuidadoso lijado.



Fig. 3.10 Punzonado de las placas internas

Es importante lavar las placas muy bien con un solvente antes de ensamblarlas, debido a que las marcas de los dedos reducen drásticamente la superficie útil y por tanto, la producción de gas a conseguir de ellas. Se debe usar guantes de goma para armar la celda, evitando en todo momento tocarlas con las manos desnudas, consiguiendo con esto las mejores condiciones de trabajo de las placas para la producción del gas hidrógeno.

### **3.2.1.1.3 Empaques de caucho reforzados**

Se utilizó el caucho debido a sus propiedades de elasticidad, condición de hermeticidad y fácil proceso de manufactura, por este motivo se utiliza en empaques, orines y materia protectora en diferentes campos de la industria.<sup>47</sup>

---

<sup>47</sup> UTN FRBA. 2010. Caucho natural. Características. [en línea]. Argentina. <<http://cienciamaterialesargentina-foro.com/t29-118-caucho-natural-caracteristicas>. [consulta 29 de mayo 2012]

### 3.2.1.1.4 Preparación de empaques de caucho

Se realizaron 16 empaques de caucho de un espesor de 2 mm. Sus dimensiones exteriores son las mismas que de las placas pequeñas (60x92 mm). Desde el extremo de los lados se tomó una distancia de 7 mm, ya que necesitamos que tenga una mayor superficie para poder hermetizar entre las placas. De esta forma quedan conformadas las celdas que serán llenadas con la mezcla agua destilada-hidróxido de sodio.

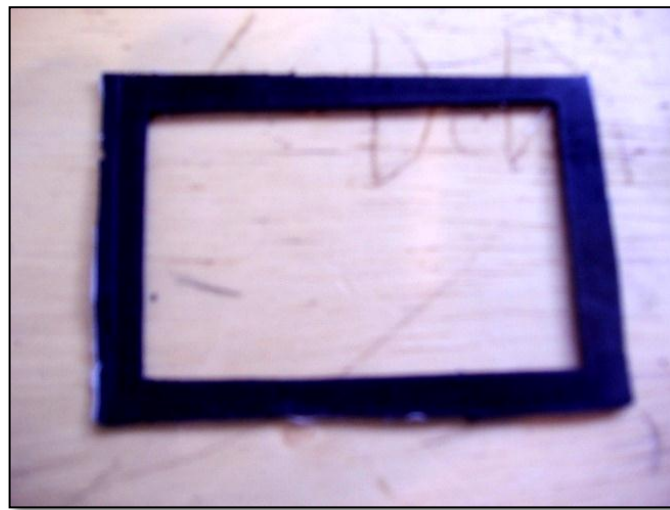


Fig.3.11 Empaque de caucho

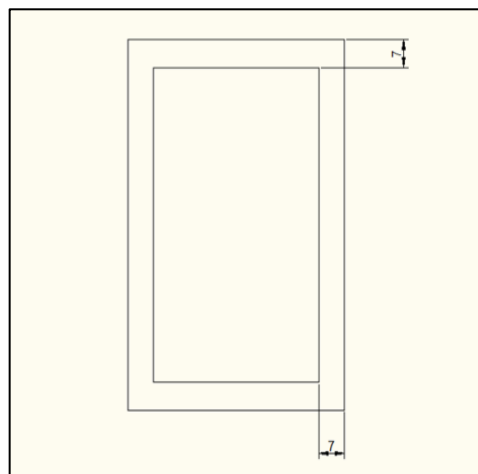


Fig. 3.12 Sección del empaque de caucho (mm)



### **3.2.1.1.5 Resina acrílica de alta dureza**

El conjunto armado se recubre con resina acrílica de alta dureza, debido a su resistencia a la acción del fuego y sus propiedades como aislante eléctrico. Debido a su alta dureza se consigue un conjunto sólido y compacto, dando la seguridad necesaria para su montaje en el vehículo.<sup>48</sup>

### **3.2.1.1.6 Colocación de la resina**

Primeramente construimos una caja en cuyo interior se aloja el conjunto de celdas. Sus dimensiones son 16x8x10 cm. A continuación verificamos que las celdas se encuentren correctamente centradas en el interior de la caja. Con las precauciones del caso procedemos a colocar la resina sintética que se encuentra en estado líquido, cubriendo el conjunto de celdas, hasta el borde de la caja.

### **3.2.2 Depósito de electrolito**

El depósito es construido de cloruro de polivinilo (PVC),<sup>49</sup> ya que el circuito de hidrógeno trabaja a baja presión. Además, ofrece otros beneficios al ser un material liviano, resistente a la corrosión, tiene buenas propiedades de permeabilidad y presenta condiciones de auto lavado, además, de que el sistema de hidrógeno es de baja presión.

### **3.2.2.1 Constitución del depósito**

Para el diseño del depósito es importante considerar el volumen de hidrolito que ocupa el generador y las cañerías. El volumen del generador se obtuvo al multiplicar el área de las celdas por el espesor de cada celda y por el número de celdas,

---

<sup>48</sup> CONSTRUMATICA. 2010. Resina Acrílica. [en línea]. Argentina. <[http://www.construmatica.com/construpedia/Resina\\_Acr%C3%ADlica](http://www.construmatica.com/construpedia/Resina_Acr%C3%ADlica)> [consulta 8 de junio de 2012]

<sup>49</sup>INDUSTRIASJQ. 2006-2011. Pvc (Policloruro de vinilo). [en línea]. Argentina. <<http://www.jq.com.ar/Imágenes/Productos/PVC/PVCprop/propiedades.htm>> [consulta 4 de junio de 2012]

consiguiendo 135 cm<sup>3</sup>, mientras que para el volumen de las cañerías se multiplica su sección por su longitud, obteniendo 101 cm<sup>3</sup>, sumando 236 cm<sup>3</sup>

Es necesario tener en cuenta que exista un volumen de reserva en el depósito, de manera que el generador esté siempre abastecido. En base a esto, se ha determinado que el volumen óptimo del depósito es 1500 cm<sup>3</sup>, ocupando el hidrolito un máximo de 1000 cm<sup>3</sup>, que vendría a ser los 2/3 partes de su capacidad, quedando los restantes 500 cm<sup>3</sup> libres para la salida del gas HHO.

Si sumamos el volumen contenido en las celdas, las cañerías y el depósito, obtenemos un total de 1236 cm<sup>3</sup>, lo cual sería el volumen ideal de hidrolito. En base al volumen necesario obtenido, podemos determinar las otras dimensiones como diámetro y longitud. Nos imponemos un diámetro de 4 pulgadas, ya que de esta forma obtenemos una longitud de 18,50 cm, adecuada para el montaje, como se muestra a continuación:

$$V = \frac{\pi \times D^2}{4} \times L$$

Despejamos la longitud L y obtenemos la siguiente expresión:

$$L = \frac{4 \times V}{\pi \times D^2}$$

$$L = \frac{4 \times 6000 \text{ cm}^3}{\pi \times (10,16 \text{ cm})^2}$$

$$L = 18,50 \text{ cm.}$$

En caso de haber seleccionado la tubería de 2 pulgadas de diámetro según nuestros requerimientos, la longitud sería de 74 cm, imposibilitando su montaje en el vehículo. De haber escogido la tubería de 6 pulgadas de diámetro, su longitud sería de 8,22 cm, sin embargo su montaje en el vehículo sería dificultoso debido al ancho excesivo del depósito.

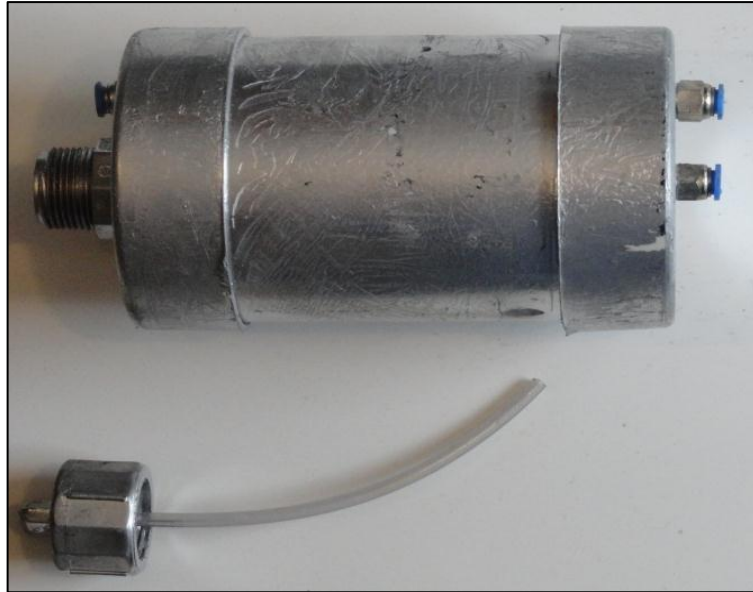


Fig. 3.13 Vista del depósito

### 3.2.2.2 Construcción del depósito

Una vez establecidas las dimensiones, colocamos en sus extremos dos tapas del mismo material, las mismas que van a ser unidas con una pega especial para este tipo de materiales. Una vez que haya pasado el tiempo necesario de secado realizamos la prueba respectiva de estanqueidad colocando agua en su interior, revisando que no presente filtraciones entre las uniones.

A continuación procedemos a trabajar en el depósito adecuándolo para nuestros requerimientos. En la parte superior del depósito se adapta una toma roscada para el alojamiento de la tapa. Adicionalmente junto a la toma colocamos un acople rápido, roscándolo sobre la superficie de la tapa, para salida del gas HHO hacia el atrapa llama. En el centro de la tapa inferior se rosca para colocar un acople rápido por donde se va a suministrar el hidrolito hacia el conjunto de celdas y hacia la periferia de la tapa se rosca para colocar otro acople rápido por donde retorna el gas proveniente del generador, ocasionando una agitación del hidrolito presente en el depósito, promoviendo así la salida del gas HHO hacia el exterior por la salida superior.



Fig. 3.14 Vista de la tapa del depósito, y los conductos de entrada y salida

### 3.2.3 Atrapa llama

Es un dispositivo de seguridad para proteger al sistema de alimentación de hidrógeno. Posee internamente una cama de agua la cual tiene como función evitar que una fuente de ignición entre en contacto con el gas HHO y viaje por las tuberías hacia el depósito. El agua utilizada no necesariamente es pura. El atrapa llama cuenta con dos orificios en la parte superior, uno de entrada y otro de salida del gas. Su fabricación es realizada con PVC. Las dimensiones de este elemento deben ser menores que las del depósito, debido a que su función es la de prevenir retrocesos de llama.

Para su diseño consideramos que como diámetro debe tener la medida suficiente como para alojar los dos acoples de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro (12,7 mm), sumando entre los dos 25,4 mm. A esto hay que adicionar el diámetro del agujero por el cual ingresa agua al atrapa llama, ubicado en el centro de la tapa, que es de 1 pulgada (25,4 mm). Entre los acoples y el orificio de entrada de agua debe haber una distancia mínima de seguridad, que consideramos de 5 mm y entre el filo de la tapa y el inicio de los racores, una distancia de 8 mm, consiguiendo un diámetro total de la tapa del atrapa llama de 76,8 mm. Considerando que el espesor de la tapa es de 3mm, tenemos que el diámetro del cuerpo del atrapa llama es 70,8 mm. El tubo seleccionado tiene  $2\frac{3}{4}$  pulgadas, que es la medida comercial, y equivale a 69,85 mm.

Para prevenir un retroceso de llama es necesario que el agua ocupe por lo menos las  $\frac{3}{4}$  partes del atrapa llama, de manera que el fuego no tenga espacio para expandirse, extinguiéndose en el agua. Consideramos conveniente construir el atrapa llama con una longitud de 120 mm, con lo cual el volumen total sería 460 cm<sup>3</sup>. Si colocamos agua hasta las  $\frac{3}{4}$  partes del atrapa llama, el volumen ocupado por el líquido sería 345 cm<sup>3</sup>, cantidad suficiente para detener cualquier retroceso de llama.



Fig. 3.15 Vista del atrapa llama

### 3.2.4 Amperímetro

*“El amperímetro es un aparato o instrumento que permite medir la intensidad de corriente eléctrica, presentando directamente sobre su escala calibrada las unidades empleadas para ello denominadas amperios o bien fracciones de amperios, la medida deseada.”*<sup>50</sup>

Mide la intensidad de corriente que actúa en las celdas. La cantidad de hidrógeno generado es mayor al aumentar el amperaje. Para controlar la intensidad de corriente que consume el sistema se realizó una placa electrónica por medio de la cual

<sup>50</sup> MITECNOLÓGICO. 2010. Amperímetros. [en línea]. México. <<http://www.mitecnologico.com/Main/Amperímetros>> [consulta 2 de junio de 2012]

observamos el amperaje y por consiguiente, la producción de hidrógeno. A través de la placa electrónica podemos conocer la intensidad de corriente con que trabajan las celdas. Este valor lo podemos ver por medio de un display digital, que nos indica además, el estado de producción de hidrógeno clasificado en tres niveles según el amperaje de trabajo.

El primer nivel es el de menor amperaje (0 a 0,7 A) considerado como crítico en el que la producción de hidrógeno es nula. Esto puede ser debido a una insuficiente cantidad de hidrolito o problemas en el suministro de corriente al generador. El segundo nivel (0,8 a 1,6 A) llamado normal, es donde la producción de hidrógeno es la apropiada según la capacidad del generador. El tercer nivel considerado como recalentamiento (1,7 a 4 A) nos indica que existe alguna anomalía en el funcionamiento, como exceso de electrolito en la solución, o problemas con el sistema eléctrico.

Amperaje	Nivel de funcionamiento
0 – 0,7	Crítico
0,8 – 1,6	Normal
1,7 – 4	Sobrecalentamiento

Tabla 3.1 Niveles de funcionamiento del generador en función del amperaje

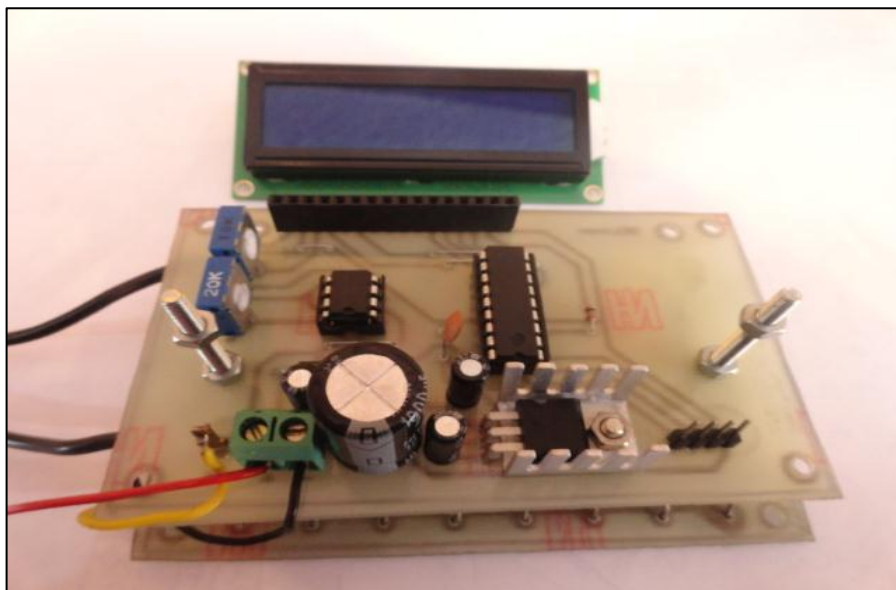


Fig. 3.16 Placa electrónica del amperímetro

### 3.2.5 Cañerías de goma transparente

El material utilizado para la construcción de los tubos es polímero,<sup>51</sup> que debe presentar elasticidad, flexibilidad y tener cierta resistencia a las altas temperaturas. Los tubos deben estar fijados a la carrocería mediante bridas, evitando en lo posible que entren en contacto con partes calientes, tratando de dejar los tubos no muy estirados, permitiendo que tanto el hidrolito como el hidrógeno circulen con facilidad.

### 3.2.6 Soportes de fijación

El material utilizado para los soportes es aluminio, ya que beneficia en su montaje al ser liviano y fácil de mecanizar. Los soportes están destinados a fijar los elementos del separador a la carrocería del vehículo, de manera que no interfiera en el funcionamiento del resto de elementos.



Fig. 3.17 Soporte del depósito



Fig. 3.18 Soporte de fijación del separador

---

<sup>51</sup> TEXTOS CIENTIFICOS. 2005. Fabricación de tubos en material polímero en la industria. [en línea]. España. <<http://www.textoscientificos.com/polimeros/introduccion>> [consulta 10 de junio de 2012]

### 3.2.7 Cables

#### Cálculo de la sección del conductor eléctrico

Para calcular la sección adecuada del cable eléctrico, utilizamos la siguiente formula:

$$S = \frac{2 \cdot \gamma \cdot L \cdot I}{\Delta V}$$

Donde:

S = Sección del cable (m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = Resistividad del cobre ( $\Omega \cdot m$ )

L = Largo del conductor (m)

I = Intensidad de corriente que pasa.

$\Delta V$  = Caída de tensión en el conductor.

Reemplazando los datos obtenemos el valor buscado:

$$S = \frac{2(1,71 \times 10^{-8} \Omega m) \cdot (1 m) \cdot (10 A)}{1,5 V}$$

$$S = 2,28 \cdot 10^{-7} m^2$$

$$S = 0,228 mm^2.$$

Con este valor podemos calcular el diámetro del conductor, de la siguiente manera:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 A}{\pi}}$$

$$d = 0,539 mm.$$



Con este valor buscamos en la siguiente tabla el diámetro comercial más cercano, obteniendo que se puede trabajar con un cable AWG 23.

Codigo AWG	Diametro del conductor (mm)	Ohmios por kilometro	Amperaje maximo para distancias cortas	Amperaje maximo para distancias largas
OOOO	11.684	0.16072	380	302
OOO	10.40384	0.202704	328	239
OO	9.26592	0.255512	283	190
0	8.25246	0.322424	245	150
1	7.34822	0.406392	211	119
2	6.54304	0.512664	181	94
5	4.62026	1.027624	118	47
16	1.29032	13.17248	22	3.7
17	1.15062	16.60992	19	2.9
18	1.02362	20.9428	16	2.3
19	0.91186	26.40728	14	1.8
20	0.8128	33.292	11	1.5
21	0.7239	41.984	9	1.2
22	0.64516	52.9392	7	0.92
23	0.57404	66.7808	4.7	0.729
24	0.51054	84.1976	3.5	0.577
25	0.45466	106.1736	2.7	0.457
26	0.40386	133.8568	2.2	0.361
27	0.36068	168.8216	1.7	0.288

Tabla 3.2 Calibre del cable en función del amperaje

### 3.2.8 Características del relé

El relé utilizado para el funcionamiento del sistema eléctrico trabaja con 12V, con una capacidad de 30 A. Tiene las características de ser un dispositivo electromecánico controlado a través de un interruptor eléctrico.



Fig. 3.19 Relé y fusible del sistema eléctrico

### 3.2.9 Conectores

Este tipo de conectores son de conexión rápida (fast on),<sup>52</sup> con lo cual se evita el empleo de bridas roscadas para la conexión con las mangueras. En el tanque se utilizan 3 conectores, en el conjunto de celdas 2, en el atrapa llama 2 y en la base del depurador 1.



Fig. 3.20. Acople rápido de mangueras

### 3.2.10 Electrolito

La cantidad de electrolito que se debe añadir al agua no es una cantidad fija, sino es proporcional a la distancia entre placas, es decir, se añade más electrolito cuanto mayor sea esta distancia. La composición química empleada en nuestro caso como electrolito es hidróxido de Sodio (NaOH), el cual permite aumentar la conductividad del agua destilada, de forma que si la distancia entre placas es corta, la conductividad no debe ser muy alta, y si la distancia es mayor se añade más electrolito para aumentar la conductividad.

Para nuestro trabajo se recomienda emplear de 8 a 10 gramos de electrolito por cada litro de agua destilada, con lo cual estaríamos trabajando con una concentración del 0,8 a 0,10%. En menores cantidades se reduce la conductividad eléctrica de la

---

<sup>52</sup> SUMIN. 2009. Acoples Rápidos. [en línea]. Argentina.  
<[http://www.sumin.com.ar/productos/comet/acoples\\_rapidos.htm](http://www.sumin.com.ar/productos/comet/acoples_rapidos.htm)> [consulta 1 de junio de 2012]

solución, y en mayores cantidades, el líquido se torna viscoso y corrosivo<sup>53</sup>, dificultando así su circulación por el interior del generador, además, si la concentración es excesiva, las placas y los empaques se verán afectados en menor tiempo.

### 3.3 Ubicación y distribución de cada uno de los componentes en el vehículo

#### 3.3.1 Generador

El generador debe ser instalado en el compartimento del motor; lo ideal sería delante del radiador (entre la mascarilla del guardachoque y el radiador), también delante de las ruedas delanteras (detrás del plástico protector), en lugares que tengan buena ventilación. Si no existiera lugar alguno en el motor se puede montar todo el sistema en el maletero. Es aconsejable revisar minuciosamente que cada componente del generador de hidrógeno no interfiera con el trabajo de los elementos del motor ni de ningún sistema auxiliar.

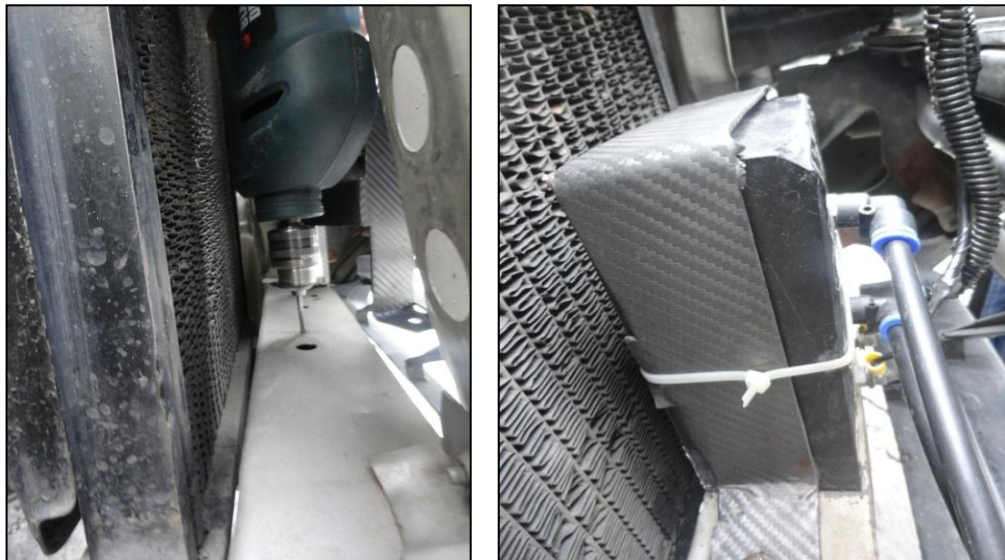


Fig 3.21 Ubicación del generador electrolítico frente al radiador

---

<sup>53</sup> MIN AMBIENTE [en línea]. Colombia. <<http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia17.pdf>> [consulta 27 de julio de 2012]

### 3.3.2 Depósito

La base del depósito debe estar ubicada como mínimo 10 cm más alto respecto a la entrada de hidrolito al generador, asegurando de esta forma su abastecimiento. El tanque tiene que estar en un lugar accesible, ya que es necesario revisar periódicamente el nivel de hidrolito.

### 3.3.3 Atrapa llama

Se recomienda instalar el atrapa llama cerca del depósito a una altura similar, de manera que la instalación de los tubos de entrada y salida de hidrógeno sea sencilla y de fácil acceso. Se sujeta a la carrocería por medio de unas platinas como podemos observar en las siguientes gráficas.



Fig. 3.22. Ubicación del atrapa llama en el habitáculo

### 3.3.4 Relé

El relé necesita estar ubicado en lugares de fácil acceso, ya que desde aquí se rutean los cables de alimentación y distribución del sistema. Es necesario considerar también que su lugar de instalación esté libre de humedad, para evitar su deterioro.

### 3.3.5 Amperímetro

Lo ideal sería instalar el amperímetro en el interior de la cabina; para nuestro caso optamos por ubicarlo bajo el panel de instrumentos, lo que le permitirá controlar de manera permanente el buen funcionamiento del sistema y también observar cuando sea necesario agregar hidrolito.



Fig. 3.23. Ubicación del amperímetro en la cabina

### 3.3.6 Conector de la manguera de admisión de aire

La realización del agujero en el ducto de admisión de aire se lo realiza con un acople rápido (12,7 mm). Es donde se va a fijar la manguera de llegada de hidrógeno, proveniente del arresta llama. Lo ideal sería después del filtro de aire, tan cerca de la entrada del motor como sea posible.

El agujero por donde ingresa el hidrógeno obtenido al motor se lo realiza en la base del depurador, entre el filtro y la garganta del carburador, para que sea arrastrado por el aire que entra al motor hacia el interior del mismo. De esta manera al carburador ingresa el aire filtrado combinado con el hidrógeno producido. Luego de taladrar el agujero, colocamos firmemente un acople rápido que nos permita introducir el hidrógeno sin fugas, trasladándolo desde el arresta llama hasta el depurador mediante una cañería de goma.

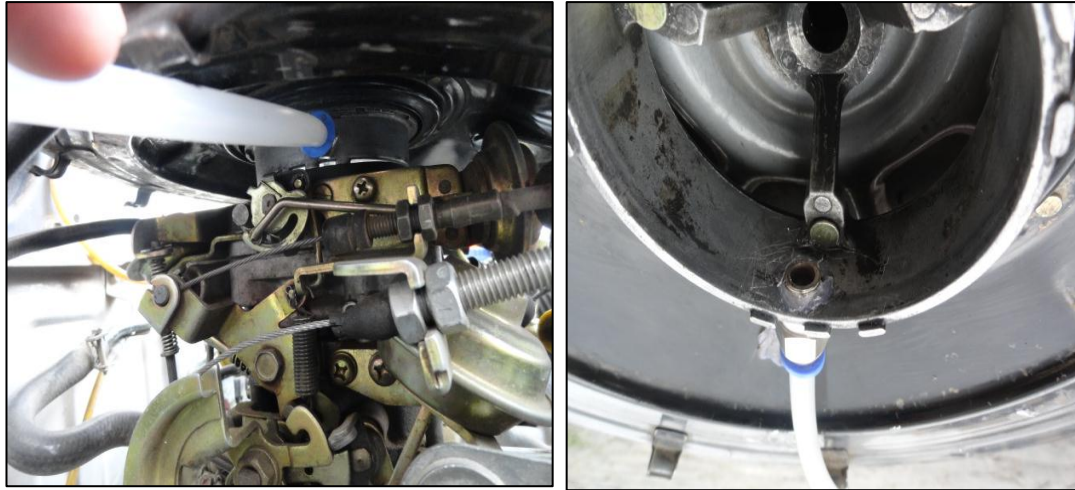


Fig. 3.24 Ubicación del orificio en el depurador para la entrada del hidrógeno al motor

### 3.4 Proceso de montaje del conjunto

Es necesario que los elementos constitutivos del separador de hidrógeno estén lo más alejado posible de las zonas calientes y que más bien se encuentren expuestos a ventilación. Los componentes deben estar sujetos firmemente en la carrocería, de manera que no presente anomalías durante su funcionamiento. En nuestro caso para reforzar la sujeción, colocamos soportes y bridas que enlacen la carrocería con los componentes del sistema, observando que se lo haga en partes duras y resistentes.

#### 3.4.1 Cañerías

Para la instalación correcta de las cañerías es necesario seguir las recomendaciones siguientes:

- Las cañerías no deben pasar por zonas calientes del motor, ya que estas son de goma y podrían deteriorarse con las altas temperaturas.
- Usar abrazaderas plásticas para fijar firmemente las cañerías a las diferentes partes de la carrocería (para evitar cualquier pérdida de agua o gas HHO).

- En el ruteo de las cañerías es importante tener en cuenta que no debe existir abolladuras ni estrangulaciones, ya que esto impediría el flujo normal de los gases.

### 3.4.2 Conexiones eléctricas

Una vez instalados los elementos principales, seguimos con la parte eléctrica, teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- Partimos identificando el cable de la posición ON del interruptor de encendido, a través de un foco comprobador, con la finalidad de que el sistema funcione únicamente en esta posición. Adicionamos al circuito un interruptor independiente que permitirá su activación cuando el usuario lo requiera, el mismo que comanda el relé del circuito.
- Realizar la derivación a masa fijando el cable negativo a la carrocería a través de tornillos, o conectando directamente al borne negativo de la batería. Los cables negros van a masa (borne 31) y los cables rojos – amarillos van al positivo (borne 30). Los cables que conectan los interruptores deben estar debidamente aislados y en buenas condiciones, para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento.

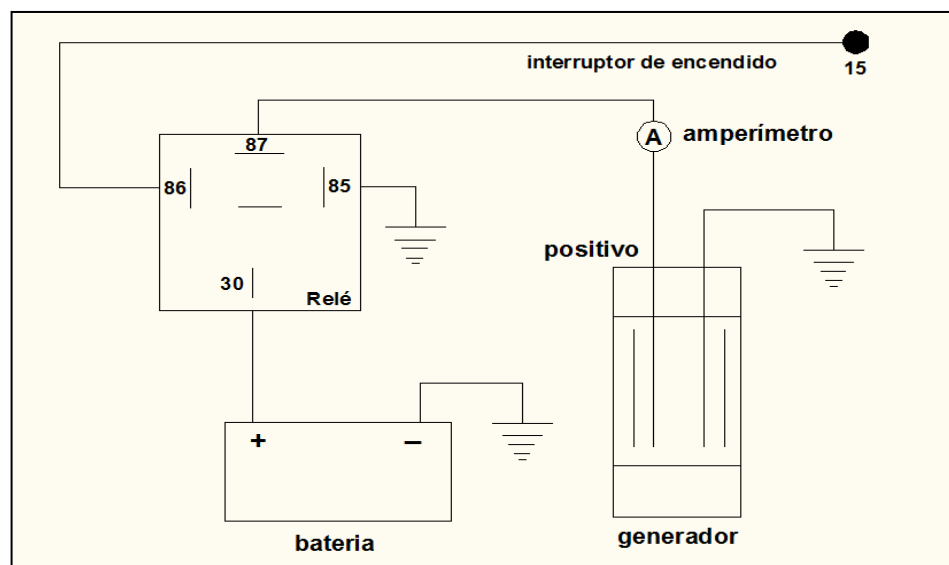


Fig. 3.25 Diagrama de conexiones eléctricas

### **3.5 Calibración del sistema**

#### **3.5.1 Preparación del hidrolito**

El electrolito (NaOH) disuelto en el agua puede funcionar hasta 263 K sin congelarse. Si la temperatura ambiente está debajo de este límite, esperar que el motor se caliente antes de encender la celda generadora de hidrógeno. Para preparar el hidrolito procedemos a agregar de 8 a 10 gramos de NaOH por cada litro de agua destilada. Agitamos el líquido hasta que su composición quede completamente homogénea. El depósito en el que se coloca la mezcla es de 1,5 litros, es decir, colocamos 2/3 del mismo, verificando regularmente que se mantenga en este nivel.

Una vez instalado todo, encendemos el vehículo y con el generador encendido, controlamos el voltaje que consume la celda. Debería estar entre 13,5 -13,8 V. Colocar hidrolito en el depósito hasta el nivel máximo indicado. Llegado a este punto, poner en funcionamiento el equipo durante unos 15 a 20 min y controlar la intensidad de corriente. Es muy importante medir el amperaje que la celda está consumiendo. El flujo de hidrógeno producido varía en función de la corriente de entrada.

#### **3.5.2 Amperaje requerido según el flujo de hidrógeno**

Para calcular la cantidad necesaria de hidrógeno que requiere nuestro vehículo, realizamos una serie de cálculos utilizando parámetros conocidos como la cilindrada, régimen de giro en ralentí y eficiencia volumétrica. Teóricamente la admisión de aire equivale al 100% de la cilindrada del vehículo, pero en la práctica la cantidad de aire admitido corresponde al 65% de la cilindrada del vehículo, por lo que podemos decir que por cada ciclo ingresan 650 cm<sup>3</sup> de aire al motor.

Considerando que el régimen de giro en ralentí del motor es de 900 rpm y que un ciclo se cumple cada dos vueltas de giro del cigüeñal, tenemos que para ralentí en un minuto se ha admitido 292500 cm<sup>3</sup> de mezcla aire-combustible, o sea 292,5 litros, valor que representa el 100 % de mezcla que ingresa al motor por minuto. En teoría la relación aire-combustible ideal es de 14,7:1. Esto significa que por cada gramo de



combustible el motor requiere de 14,7 gramos de aire. Considerando la densidad del aire igual a 1,18 g/l, podemos obtener la masa de aire que ingresa al motor cada minuto, valiéndonos de la fórmula de la densidad:

$$d = \frac{m}{v}$$

Donde:

m = Masa (g)

v = Volumen (l)

$$m = 1,18 \text{ g/l} (292,5 \text{ l})$$

$$m = 345,15 \text{ g}$$

Para encontrar la masa de combustible consumido por minuto, dividimos el valor de la masa de aire para la relación estequiométrica, obteniendo un consumo de 23,48 g. Realizamos una regla de tres para determinar la cantidad de gramos de hidrógeno que ingresan al motor cada minuto, considerando que se trabaja con un 5 % de adición de hidrógeno.

$$\frac{23,48 \text{ g}}{x} = \frac{100\%}{5\%}$$

Despejamos la incógnita  $x$  obteniendo que para nuestro motor se requiere de 1,174 gramos de hidrógeno por minuto. Para encontrar el volumen consumido teóricamente, utilizamos nuevamente la fórmula de la densidad:

$$v = \frac{m}{d}$$

$$v = 0,994 \text{ l.}$$

El cálculo práctico del volumen obtenido se lo realiza de la siguiente manera:

- Colocamos agua con detergente diluido en un vaso
- Activamos el generador hasta que alcance su temperatura normal de funcionamiento
- Desconectamos la cañería de entrada del gas HHO al atrapa llama y sumergimos su extremo libre en el vaso con agua jabonosa.
- Retiramos la cañería del vaso y medimos el tiempo en que la burbuja alcance un radio estimado de 25 mm.
- Con los datos obtenidos procedemos a calcular el volumen de la burbuja, empleando la fórmula del volumen de la esfera.

$$v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

$$v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (2,5 \text{ cm})^3$$

$$v = 65,45 \text{ cm}^3$$

- Con el valor del volumen obtenemos el flujo de gas HHO que nuestro generador produce, mediante una regla de tres, considerando que la burbuja se forma aproximadamente en 5 segundos.

$$\frac{65,45 \text{ cm}^3}{x} = \frac{5 \text{ s}}{60 \text{ s}}$$

$$x = 785,4 \text{ cm}^3 / \text{min.}$$

El flujo de hidrógeno lo obtenemos al multiplicar el valor obtenido por  $2/3$ , ya que el gas HHO está compuesto en sus dos terceras partes por hidrógeno, y su tercera parte restante por oxígeno.

$$H_2 = 785,4 \text{ cm}^3 / \text{min} (2/3)$$

$$H_2 = 523,6 \text{ cm}^3$$

El volumen restante corresponde al oxígeno producido que es introducido al interior del motor junto con el hidrógeno y es 261,8 cm<sup>3</sup>. Para generar 0,785 l/min de gas HHO necesitamos 0,8 a 1,4 A de acuerdo a nuestros datos que se obtuvieron experimentalmente mediante la lectura del amperímetro.

### **3.6 Aspectos a ser considerados en cuanto a funcionamiento y seguridad**

En el presente trabajo no existe riesgo de explosión del hidrógeno generado, ya que no es almacenado sino combustionado inmediatamente luego de ser producido. Si a esto añadimos la presencia del atrapa llama como dispositivo de seguridad, tendremos como resultado que el sistema es altamente confiable en cuanto a seguridad y desempeño. Un factor muy importante a ser considerado es el hecho que el hidrógeno es absorbido por el vacío presente en el múltiple de admisión del motor, reduciendo cualquier posibilidad de retroceso de llama.

En caso de presentarse un retroceso de llama proveniente del carburador, éste llegará hasta el atrapa llama donde se extinguirá, debido al agua presente en su interior, impidiendo que avance hacia el depósito. Pese al bajo riesgo de incendio o explosión causado por el generador de hidrógeno, siempre es recomendable observar ciertas precauciones, de modo que el funcionamiento se dé en las mejores condiciones. Una vez completo el proceso de instalación del generador y sus componentes, es necesario verificar que cada elemento trabaje de manera óptima. Se recomienda seguir los siguientes pasos:

#### **3.6.1 Abastecimiento del circuito**

Primeramente es necesario verificar que todas las conexiones eléctricas y que las cañerías estén bien acopladas, para evitar pérdidas del líquido. La manera de abastecer el circuito es abriendo la tapa del depósito, y con un embudo colocar un litro de hidrolito en su interior. Por efecto de la gravedad, el líquido pasa al separador, cubriendo el grupo de celdas. El sistema debe ser comandado desde el interruptor destinado para este fin. Comprobamos con un voltímetro que al grupo de

celdas esté ingresando el valor de tensión de trabajo (12 a 14 V). Encendemos el motor del vehículo mientras esperamos hasta que el sistema alcance su temperatura de funcionamiento (unos 15 minutos).

La forma de verificar si el generador está trabajando es desconectar la manguera de salida, por donde debería observarse un burbujeo continuo y abundante, determinando el buen funcionamiento del sistema. Volvemos a conectar la manguera al generador y observamos si al depósito está llegando el fluido en forma de burbujas, lo cual provoca un burbujeo en el interior del mismo, incrementándose levemente la presión en su interior. Esto origina el desplazamiento del gas HHO hacia el exterior, ya que en el interior del depósito el gas ocupa la parte alta mientras que en la parte baja se encuentra el hidrolito. El gas HHO pasa ahora al atrapa llama y sin modificaciones ingresa al depurador a través de un orificio realizado con este fin.

### **3.6.2 Funcionamiento del sistema**

Durante el funcionamiento del sistema, se debe tener en cuenta varios aspectos para lograr buenos resultados:

- El nivel de hidrolito debe estar siempre ocupando las dos terceras partes del depósito. Esto se debe verificar semanalmente, y si es necesario, se añade hidrolito hasta alcanzar el nivel óptimo.
- En el atrapa llama el agua debe ocupar aproximadamente la mitad de su volumen.
- Se debe tratar de localizar fugas en el circuito, para lo cual rociamos de agua jabonosa las uniones y demás conexiones.
- El agujero practicado en el depurador para ingreso del hidrógeno debe estar ubicado entre el filtro y la garganta del carburador, con la finalidad de que la succión generada en la entrada de aire arrastre la totalidad del hidrógeno.
- Es recomendable también controlar la temperatura de trabajo del sistema, ya que si la misma es excesiva, ocasionará averías en los empaques de las celdas, y en las cañerías de goma.

- Verificar la intensidad de corriente con la que trabaja el sistema, ya que si la misma es inferior a 0,7 A, la producción de hidrógeno es nula, y si es superior a 1,7 A, se producirá un sobrecalentamiento que afectará los componentes.
- Es importante tener en cuenta que las fuentes de calor tales como múltiple de escape, cárter y demás elementos del motor no deben estar en contacto con los componentes del sistema de hidrógeno, ya que podrían ser una fuente de ignición. Se recomienda ubicar los componentes en zonas ventiladas.
- En el empleo del sistema de alimentación de hidrógeno no existe riesgo de asfixia o irritación por exposición al gas generado. Esto se debe a la cantidad limitada, controlada y a baja presión del hidrógeno.
- Con la celda fría la intensidad se encuentra un 20% por debajo respecto a la celda caliente, por eso se recomienda dejar calentar de 15 a 20 minutos el generador y realizar las pruebas con el motor acelerado a 2500 - 3000 revoluciones. Si la cantidad de NaOH es excesiva, simplemente vacíe un poco (o directamente la mitad) de hidrolito del depósito con una bomba manual, nunca aspirando con la boca. Agregarle nueva agua destilada y volver a medir pasando unos 15 minutos.
- Asegúrese de colocar bien todos los componentes del sistema y que no existan pérdidas de líquido en ningún elemento (depósito, tubos, celda, atrapa llama).

## **Conclusiones**

Debido a las propiedades del hidrógeno gaseoso, la construcción del sistema de generación de este gas debe ser muy meticulosa y precisa en todos sus componentes. Con este tipo de sistemas el riesgo es muy reducido, ya que no se almacena hidrógeno, además, se lo produce en cantidades pequeñas. En caso de que se produzca una fuga de gas, debido a sus propiedades se disipa rápidamente en la atmósfera, combinándose con el aire y reduciendo su concentración. Todos los componentes deben estar instalados y montados correctamente. El sistema funcionará una vez que alcance su temperatura óptima de trabajo.

## CAPITULO IV

### PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En el presente capítulo nos enfocaremos a realizar pruebas de funcionamiento de diferente tipo, con el motor en condiciones estándar, y con el sistema de alimentación de hidrógeno activado. En base a los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño, podemos estimar qué tan conveniente es la adaptación del equipo en un automóvil.

Un aspecto importante que se analiza en este capítulo es la reducción del nivel de emisiones contaminantes que se da entre el vehículo estándar y con el sistema de hidrógeno en funcionamiento. El estudio se centra en la relevancia de esta diferencia. De igual manera se realizó un estudio económico con la finalidad de determinar si la cantidad de dinero economizado al emplear el sistema, justifica los gastos ocasionados por concepto de su implementación.

#### 4.1 Aceleración

*“La aceleración mide directamente la rapidez con que cambia la velocidad. Si un vehículo se desplaza por una carretera, su velocidad varía muchas veces durante el viaje; estos cambios en la velocidad se deben porque es imposible mantener una velocidad constante durante un trayecto, ya que pueden ocurrir situaciones que obliguen al conductor a aumentar la misma o a disminuirla. Por ejemplo, puede que el conductor deba frenar bruscamente en una situación de emergencia o bien puede que necesite aumentar la velocidad para adelantar a otro vehículo.”*<sup>54</sup>

---

<sup>54</sup> LA ACELERACION. 2011. [en línea] España.  
<http://diccionario.motorgiga.com/diccionario/aceleracion-0-100-km>. [consulta 8de julio2012]

*“En cualquiera de las dos situaciones, hay un cambio de velocidad. Esta variación de la velocidad es medida mediante la aceleración, que es un concepto que describe cambios de velocidad. Mide la variación de la velocidad en el tiempo.”*

#### **4.1.1 Prueba de Aceleración 0-100 m**

Realizamos dos pruebas de aceleración. En la primera cronometramos el tiempo en que el automóvil llega a los 100 m de recorrido partiendo del reposo. Para ello colocamos una serie de conos ubicados cada 5 m, hasta completar los 100 m. Para realizar nuestra prueba de aceleración escogimos una vía plana y en buenas condiciones, tanto en la altura de Cuenca (2500 msnm), como a nivel del mar (0 msnm). El lugar seleccionado para la prueba en altura está en la autopista Cuenca – Azogues, sector Challuabamba, y para la prueba a nivel del mar escogimos la vía Cuenca – Puerto Inca, en las cercanías de Naranjal. Para lograr datos más precisos, se realizó la prueba en ambos sentidos.

##### **4.1.1.1 Prueba a 2500 msnm**



Fig. 4.1 Prueba de aceleración de 0 a 100 m - 2500 msnm

Extraemos los datos obtenidos para cada uno de los sistemas de alimentación, con la finalidad de realizar un promedio y establecer en qué medida ayuda el aporte del hidrógeno en la aceleración.

### Con combustible nafta

Tiempo 1 (s)	9,44
Tiempo 2 (s)	9,32
Tiempo 3 (s)	9,48
Tiempo 4 (s)	9,26
Suma de tiempos (s)	37,50
<b>Promedio (s)</b>	<b>9,38</b>

Tabla 4.1 tiempos de aceleración con combustible nafta

### Con sistema mixto

Tiempo 1 (s)	9,36
Tiempo 2 (s)	9,28
Tiempo 3 (s)	9,40
Tiempo 4 (s)	9,22
Suma de tiempos (s)	37,26
<b>Promedio (s)</b>	<b>9,32</b>

Tabla 4.2 tiempos de aceleración con sistema mixto

Como se puede observar, el valor promedio de las pruebas nos da como resultado que con el sistema de alimentación mixto el auto alcanza los 100 m apenas 0,06 s antes que en condiciones estándar. Esto significa que empleando el sistema mixto se da una mejora en la aceleración, aunque en niveles muy bajos.



#### 4.1.1.2 Prueba a 0msnm



Fig. 4.2 Prueba de aceleración de 0 a 100 m - 0 msnm

#### Con combustible nafta

Tiempo 1 (s)	8,64
Tiempo 2 (s)	8,40
Tiempo 3 (s)	8,46
Tiempo 4 (s)	8,30
Suma de tiempos (s)	33,80
<b>Promedio (s)</b>	<b>8,45</b>

Tabla 4.3 tiempos de aceleración con combustible nafta

#### Con sistema mixto

Tiempo 1 (s)	8,46
Tiempo 2 (s)	8,28
Tiempo 3 (s)	8,44
Tiempo 4 (s)	8,34
Suma de tiempos (s)	33,52
<b>Promedio (s)</b>	<b>8,38</b>

Tabla 4.4 tiempos de aceleración con sistema mixto

De acuerdo a los valores obtenidos con las mediciones a nivel del mar, podemos afirmar que el aporte de hidrógeno al igual que a 2500 msnm, no representan una mejora significativa en cuanto a aceleración, ya que apenas se ha mejorado 0,07 s respecto al motor en condiciones estándar. Procesando estadísticamente los tiempos cronometrados, podemos obtener los porcentajes referentes a la mejora en la aceleración.

- En la altura de Cuenca, el tiempo de aceleración registrado en esta prueba baja de 9,38 s a 9,32 s por el empleo de hidrógeno, acelerando así un 0,64 % más rápido.
- A nivel del mar, el tiempo de aceleración registrado en esta prueba baja de 8,45 s a 8,38 s debido al aporte del hidrógeno, lo que representa una mejora del 0,83 %.
- Empleando nafta, el tiempo de variación entre sierra y costa es significativo. A 2500 msnm registramos un tiempo de 9,38 s mientras que a 0 msnm 8,45 s, lo que expresado en porcentaje representa una mejora en la aceleración de 9,91 %.
- Utilizando el sistema mixto en la sierra obtuvimos un valor de 9,32 s mientras que en la costa el tiempo obtenido fue de 8,38 s, obteniendo una mejora del 10,09 %.

#### 4.1.2 Prueba de aceleración 0-100 km/h

En esta prueba se mide el tiempo en que el auto alcanza los 100 km/h partiendo del reposo. Al igual que en la prueba anterior, se la realiza en la altura de Cuenca (2500 msnm) y a nivel del mar (0 msnm).

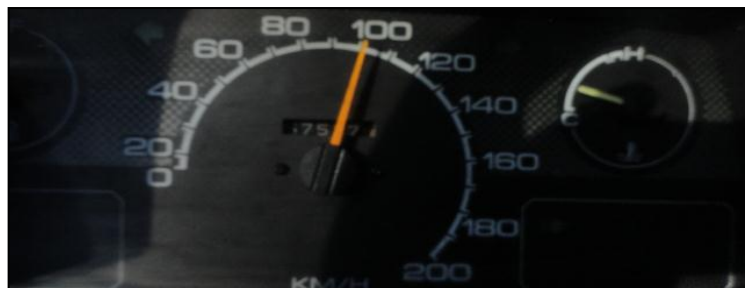


Fig. 4.3 Momento en que la velocidad llega a 100 km/h

#### 4.1.2.1 Prueba a 2500 msnm

En las tablas que se muestran a continuación constan los valores cronometrados tanto para alimentación con nafta como con sistema mixto. Con los valores obtenidos realizamos una media aritmética para estimar un valor medio de aceleración, cuando se le hace funcionar con nafta y con la mezcla de hidrógeno.

##### Con combustible nafta

Tiempo 1 (s)	14,57
Tiempo 2 (s)	15,21
Tiempo 3 (s)	14,33
Tiempo 4 (s)	15,02
Suma de tiempos (s)	59,12
<b>Promedio (s)</b>	<b>14,78</b>

Tabla 4.5 Valores obtenidos con combustible nafta

##### Con sistema mixto

Tiempo 1 (s)	14,44
Tiempo 2 (s)	14,90
Tiempo 3 (s)	14,18
Tiempo 4 (s)	14,76
Suma de tiempos (s)	58,28
<b>Promedio (s)</b>	<b>14,57</b>

Tabla 4.6 Valores obtenidos con el sistema mixto

Si restamos los valores obtenidos para aceleración, tendremos como resultado que con el sistema de alimentación de hidrógeno el auto acelera de 0 a 100 km/h 0,21 s más rápido, lo cual no representa una cifra significativa.

#### 4.1.2.2 Prueba a 0 msnm

A nivel del mar el vehículo logra mejores prestaciones debido a que el aire es más rico en oxígeno, esto significa que para un mismo volumen de aire, a nivel del mar existe mayor cantidad de partículas de oxígeno, consiguiendo así una mejor combustión. Por otra parte, la presión atmosférica es mayor, lo que facilita el llenado del cilindro, mejorando de esta forma la eficiencia volumétrica.

#### Con combustible nafta

Tiempo 1 (s)	10,12
Tiempo 2 (s)	10,28
Tiempo 3 (s)	9,98
Tiempo 4 (s)	10,16
Suma de tiempos (s)	40,54
<b>Promedio (s)</b>	<b>10,14</b>

Tabla 4.7 Valores obtenidos con combustible nafta

#### Con sistema mixto

Tiempo 1 (s)	9,96
Tiempo 2 (s)	10,04
Tiempo 3 (s)	10,10
Tiempo 4 (s)	10,08
Suma de tiempos (s)	40,18
<b>Promedio (s)</b>	<b>10,05</b>

Tabla 4.8 Valores obtenidos con el sistema mixto

Como resultados de esta prueba obtenemos lo siguiente:

- A nivel del mar utilizando nafta el auto se tarda 4,64 s menos que en la Sierra, lo que significa que acelera un 31,39 % más rápido.

- En esta misma prueba utilizando el sistema mixto el auto se tarda 4,52 s menos que en la sierra, es decir el tiempo de aceleración baja un 31,02 %.
- En la altura de Cuenca, utilizando el sistema mixto, el auto acelera un 1,42 % más rápido que empleando solamente nafta.
- A nivel del mar, en esta misma prueba, el auto acelera un 0,89 % más rápido gracias al aporte del hidrógeno.

## 4.2 Consumo

El consumo en un vehículo se calcula midiendo la cantidad de distancia que recorre para un determinado volumen de combustible consumido. Por lo general las unidades de consumo son km/galón, millas/galón o km/litro. El consumo se da en función de varios factores como coeficiente aerodinámico del vehículo, peso del mismo, afinamiento o condiciones del motor, presión de los neumáticos, presión atmosférica, peso del vehículo, estado del carretero, pericia del conductor y hábitos de conducción.

La prueba de consumo se la realiza en carretera, en ciudad y en recorrido combinado. En la prueba en carretera el consumo será menor, debido a que hay menos aceleraciones y paradas, además de que se utiliza la marcha más larga la mayoría del tiempo. Lo contrario sucede en la prueba en ciudad, donde es necesario detener repetidamente el automóvil debido a los semáforos y al tráfico habitual, además, se acelera y se frena en mayor medida. Todos estos factores hacen que el consumo de combustible se incremente notablemente.

En recorrido combinado se considera que el automóvil circula tanto por ciudad como por carretera y es el que más se aproxima al consumo real. Para todos los casos se utilizó gasolina extra, que tiene un costo de \$1,48 por galón, y se observaron conductas de manejo similares. Para realizar nuestras mediciones, lo hicimos directamente en consumo combinado. Los valores obtenidos fueron los siguientes:

Sistema	Distancia recorrida	Nafta consumida (l)	Promedio (km/l)	Costo del recorrido (USD)
Nafta	1000km	84,30	11,86	32,96
Mixto	1000km	71,75	13,94	28,05

Tabla 4.9 Datos de consumos y costos obtenidos para alimentación a nafta y para sistema mixto

Durante el recorrido de 1000 km el nivel de hidrolito descendió aproximadamente 150 cm<sup>3</sup>. Para determinar el costo de este volumen consumido consideramos que el costo del electrolito es de \$10,00 para 8 litros, mientras que el costo de agua destilada es de \$1,25 el litro. Mediante el siguiente cálculo podemos determinar el costo de hidrolito correspondiente a los 150 cm<sup>3</sup> consumidos:

$$\frac{8 \text{ litros}}{0,150 \text{ litros}} = \frac{\$ 10,00}{X_1}$$

$$X_1 = \$ 0,187$$

Ahora calculamos el costo de agua destilada consumida

$$\frac{1 \text{ litro}}{0,150 \text{ litros}} = \frac{\$ 1,25}{X_2}$$

$$X_2 = 0,187$$

Sumamos los dos valores obtenidos y como resultado tenemos que para los 1000 km recorridos el vehículo consume \$0,37 en hidrolito. Este valor se suma al costo de recorrido empleando el sistema mixto de la tabla 4.9, con lo cual el costo total asciende a \$ 28,42. De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede afirmar que para 1000 km de recorrido mixto, se han economizado \$4,54 con el aporte del hidrógeno.

### 4.3 Velocidad máxima alcanzada

La velocidad máxima alcanzada depende también de múltiples factores como la relación peso-potencia del vehículo, coeficiente aerodinámico, condiciones ambientales, potencia y torque del motor, disposición de la caja de cambios, presión de los neumáticos, calidad del combustible, condiciones de la carretera, incidencia del viento, etc.

Para esta prueba es necesario una pista plana y en excelentes condiciones, como un aeropuerto. Se procede acelerando el vehículo al máximo, en ambos sentidos y se saca un promedio entre los valores obtenidos. Para alcanzar la velocidad máxima en una distancia menor, se recomienda realizar los cambios de marcha cuando el tacómetro señale que el régimen de giro es el correspondiente al de mayor potencia del motor.

#### 4.3.1 Prueba a 2500 msnm

Durante las pruebas de velocidad máxima, tanto en el sistema de alimentación convencional a nafta como con el sistema mixto mostraron resultados similares. En ambos casos la velocidad máxima se mantenía en torno a los 150 km/h.



Fig. 4.4 Velocidad máxima a 2500 msnm

#### 4.3.2 Prueba a 0 msnm

A nivel del mar, la velocidad máxima obtenida fue de 160 km/h tanto para el sistema de alimentación convencional como para el sistema de hidrógeno. Por tal motivo podemos manifestar que el aporte de hidrógeno no incide en la velocidad máxima alcanzada por el vehículo. Se obtuvo una velocidad final superior a nivel del mar, pero no por el aporte de hidrógeno sino por la mayor presión atmosférica existente a nivel del mar.



Fig. 4.5 Velocidad máxima a 0 msnm

#### 4.4 Rendimiento: km / galón, a nivel del mar y a 2500 msnm

El rendimiento de combustible que pueda tener un automóvil se evaluó en el punto 4.2 para condiciones atmosféricas en la altura de la sierra. Los automóviles a nivel del mar desarrollan mejores prestaciones que a 2500 msnm. Esto se debe principalmente a dos factores:

- **Mayor cantidad de oxígeno:** presente por unidad de volumen en el aire, es así que el motor en cada fase de admisión introduce el mismo volumen de aire, pero el número de partículas de oxígeno es mucho mayor, optimizando la combustión.



- **Mayor presión atmosférica:** gracias a lo cual el llenado de aire del cilindro es mayor, incrementando la eficiencia volumétrica.

Estos factores inciden directamente en la cantidad de combustible requerido por un motor para una determinada distancia a recorrer, o para realizar un determinado trabajo. En el punto 4.2 obtuvimos un valor de consumo para 1000 km de recorrido. Con alimentación convencional a nafta nos daba un promedio de 11,86 km/l, mientras que con el sistema de hidrógeno el kilometraje se incrementó a 13,94 km/l, lo que supone una mejora del 17,54 %.

Sistema	Distancia recorrida	Nafta consumida (l)	Promedio (km/l)	Costo del recorrido (USD)
Nafta	200km	15,94	12,54	6,23
Mixto	200km	14,36	13,93	5,62

Tabla 4. 10 En la siguiente tabla podemos ver el consumo registrado a nivel del mar

De acuerdo a los valores obtenidos a nivel del mar, podemos observar que para los 200km recorridos se han economizado \$0,46 si hablamos únicamente de combustible. A esto hay que añadirle el costo ocasionado por el consumo de hidrolito. Para los 200 km recorridos el nivel del líquido descendió 30 cm<sup>3</sup> del depósito, lo que genera un gasto de \$0,07, siendo el costo total \$5,69. El mecanismo de cálculo es el mismo que en el punto 4.2. Estadísticamente realizamos una regla de tres para determinar el porcentaje de ahorro de combustible, dándonos una economía del 9,49 %.

En base a los resultados obtenidos podemos aseverar que a 2500 msnm mejora el rendimiento del sistema en un 15,97 % en el kilometraje, mientras que a nivel del mar la mejora es del 18,98 % respecto al kilometraje en condiciones estándar. Este fenómeno se debe principalmente a la mayor presión atmosférica y a la mayor cantidad de oxígeno por volumen de aire existente en la costa.

#### 4.5 Emisiones

Las emisiones contaminantes de los vehículos han sido un grave problema que hoy en día se busca disminuir al máximo. Este tipo de emisiones han contribuido con el deterioro del medio ambiente, cuyas consecuencias hoy en día son alarmantes. Es por esto que se ha buscado controlar el flujo de emisiones nocivas, con la implementación de ordenanzas que controlan los límites permitidos con el objeto de mejorar la calidad del aire.

La normativa Euro sobre emisiones es un conjunto de requisitos que regulan los límites aceptables para gases de combustión. Actualmente, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y partículas están reguladas para la mayoría de los tipos de vehículos. El cumplimiento se determina controlando el funcionamiento del motor en un ciclo de ensayos normalizado. A nivel nacional rige la norma INEN, que limita la emisión de ciertos gases nocivos en función del año de fabricación del vehículo y altura.

Año modelo	% CO*		ppm HC*	
	0 - 1 500 **	1 500 - 3 000 **	0 - 1 500 **	1 500 - 3 000 **
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1 000	1 200

\* Volumen  
 \*\* Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm).

Tabla 4. 11. Límites establecidos en la norma INEN, en función de la altura<sup>55</sup>

Los límites con los que trabajan los establecimientos de revisión en la ciudad de Cuenca son diferentes a los de Quito en ciertos parámetros, como podemos apreciar en la siguiente tabla.

<sup>55</sup> INEN. 2011. Ecuador. [en línea]. <http://www.aeade.net/web/images/stories/descargas/biblioteca/norma2.pdf> [consulta 10 de julio 2012]

Año de fabricación	HC ppm	CO%
Mayores al 2000	200	1
De 1990 a 1999	750	4
Menores a 1990	1200	6

Tabla 4. 12. Límites establecidos de la revisión técnica vehicular de Cuenca

Nota: Cuando el vehículo dé un valor menor a 10,5% en CO<sub>2</sub> tiene problemas del sistema de encendido (cables, bujías, platinos, bobina, etc.) El oxígeno debe ser menor al 3%. Si es mayor puede estar roto el escape, haber mayor cantidad de aire o la sonda del analizador en mal estado. El factor lambda debe acercarse a 1 y la AFR (relación estequiométrica) debe estar cerca de 14,7.

Para la prueba de emisiones acudimos a un taller donde exista un equipo analizador de gases. El tipo de analizador utilizado es de la marca Nextech, modelo GA6000. Se realizaron dos pruebas, la una a ralentí y la otra a 2500rpm, tanto para funcionamiento con nafta, y para sistema mixto.

VALORES MÁXIMOS (UMBRAL TIPO III) DE EMISIONES DE VEHÍCULOS A GASOLINA (RTV 2009)			
PRUEBA EN VACIO EN ALTAS Y BAJAS REVOLUCIONES:			
ANO MODELO	CO (% V) Monóxido de carbono	HC (ppm) Hidrocarburos	O2 (% V) Oxígeno
2000 Y POSTERIORES	1	200	5
1990 – 1999	4.5	750	5
MENOR A 1989	7	1300	5

Tabla 4. 13. Límites establecidos de la revisión técnica vehicular de Quito (Corpaire)<sup>56</sup>

<sup>56</sup> CORPAIRE. 2011. Ecuador – Quito. [en línea]. <http://www.revisionquito.gob.ec>. [consulta 10 de julio 2012]

Los valores obtenidos en nuestra medición fueron los siguientes:

COMBUSTIBLE NAFTA			
1000 rpm		2500 rpm	
CO	0,17 %	CO	3,52 %
HC	229 ppm	HC	187 ppm
CO2	12.1 %	CO2	13.7 %
O2	4.71 %	O2	0.18 %
LAMBDA	1.242	LAMBDA	0.909
AFR	18.2	AFR	13.3
FUEL	NAFTA	FUEL	NAFTA
H/C	1.8500	H/C	1.8500
O/C	0.0000	O/C	0.0000

Tabla 4. 14. Prueba de emisiones combustible nafta

SISTEMA MIXTO			
1000 rpm		2500 rpm	
CO	0,15 %	CO	2.81 %
HC	144 ppm	HC	174 ppm
CO2	13.3 %	CO2	13.5 %
O2	3.08 %	O2	0.21 %
LAMBDA	1.144	LAMBDA	0.926
AFR	16.8	AFR	13.6
FUEL	NAFTA	FUEL	NAFTA
H/C	1.8500	H/C	1.8500
O/C	0.0000	O/C	0.0000

Tabla 4. 15. Prueba de emisiones con sistema mixto

#### **4.5.1 Conclusiones**

En base a los resultados obtenidos en las pruebas de emisiones, podemos establecer las siguientes conclusiones:

##### **Para ralentí (1000 rpm)**

El nivel de CO empleando solamente nafta como combustible fue de 0,17 %, disminuyendo a 0,15 % con el aporte del hidrógeno. Con esto conseguimos una mejoría del 13,33 % En el caso del HC funcionando solamente con nafta nos dió un valor de 229 ppm, mientras que con el sistema de hidrógeno encendido nos dio 144 ppm, lo que significa una reducción del 59,03 %.

##### **Régimen de crucero (2500 rpm)**

A este régimen de giro el nivel de CO empleando solamente nafta como combustible fue de 3,52 %, disminuyendo a 2,81 % con el aporte del hidrógeno. Con esto conseguimos una mejoría del 25,27 % En el caso del HC funcionando solamente con nafta nos dio un valor de 187 ppm, mientras que con el sistema de hidrógeno encendido nos dio 174 ppm, lo que significa una reducción del 7,47 %. Los datos obtenidos nos indican claramente que el aporte de hidrógeno a la combustión reduce significativamente el nivel de emisiones contaminantes en los gases analizados, pudiendo así recomendar su uso.

#### **4.5 Durabilidad de los elementos constitutivos del motor**

El uso del generador de hidrógeno, contrariamente a lo que se pueda pensar, no ocasiona una importante modificación en las temperaturas y presiones en cada uno de los puntos del ciclo analizados (Tabla 2.16). Conforme se incrementa el porcentaje de hidrógeno introducido, los componentes del motor no se ven afectados, prolongando su vida útil.

Para la realización de esta prueba, procedemos a desmontar el cabezote del motor, el cual tiene un aproximado de 100000 km desde su última reparación integral, de los cuales ha trabajado con el sistema de alimentación de hidrógeno alrededor de 3000

km. El objetivo del desmontaje es constatar el estado de los componentes del cabezote como válvulas, guías, la cámara de combustión, bujías empaques y ductos. También verificamos el estado de la cabeza del pistón, el cual soporta las mayores presiones y temperaturas.

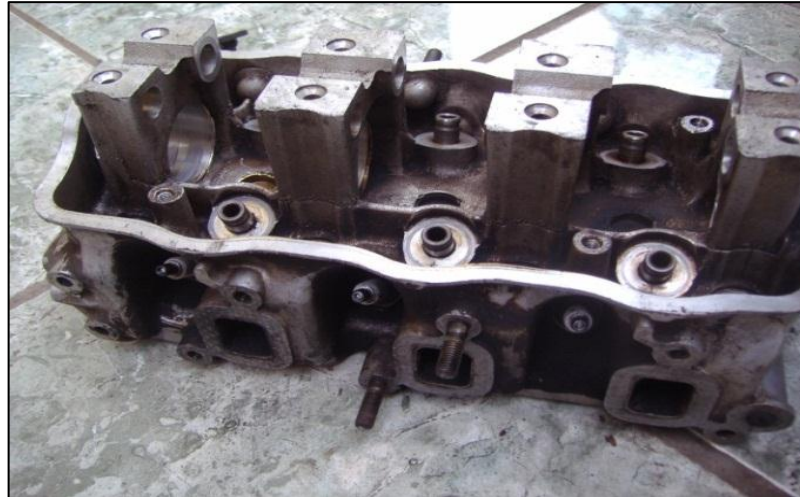


Fig. 4.6 Cabezote desarmado previo a sus pruebas

#### **4.6.1 Válvulas**

En cuanto a las válvulas observamos que no presenta deformaciones y su coloración es normal considerando su tiempo de trabajo. Además, el juego que presenta con su guía se encuentra en la tolerancia permitida. Tanto en las válvulas de admisión como en las de escape, su asiento se encuentra en buenas condiciones, garantizando la estanqueidad.

#### **4.6.2 Cámara de combustión**

Respecto a la cámara de combustión pudimos observar una cantidad de carbonilla aceptable considerando el recorrido que tiene, lo cual sugiere que no se encuentra afectado debido a la presencia de hidrógeno.

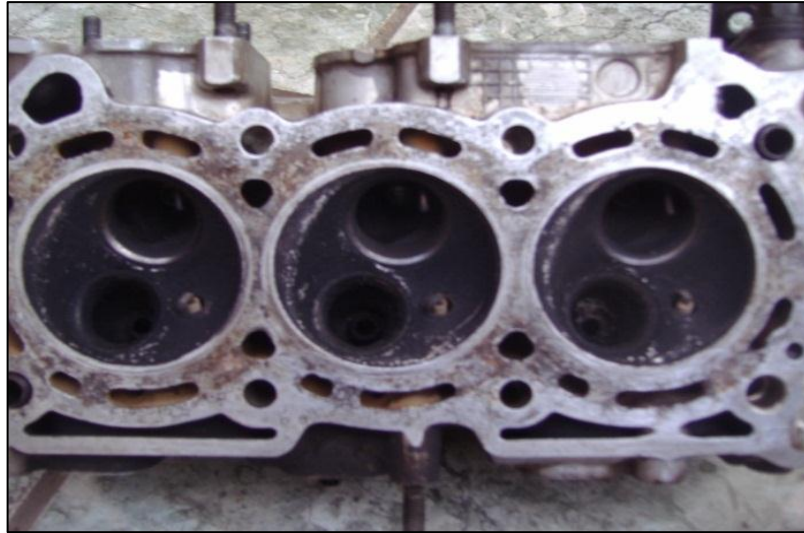


Fig. 4.7 Estado del cabezote

Determinamos las condiciones en las que se encuentran las bujías, esto nos indica la calidad de la combustión. Pudimos observar que trabajan con normalidad, debido a la coloración y estado de sus electrodos, estos corresponden al de una buena combustión. Para determinar la planicidad del cabezote se procedió con su lavado, con la finalidad de eliminar cualquier tipo de impureza que pueda afectar las mediciones. De acuerdo a los resultados obtenidos el cabezote se encuentra sin deformaciones.

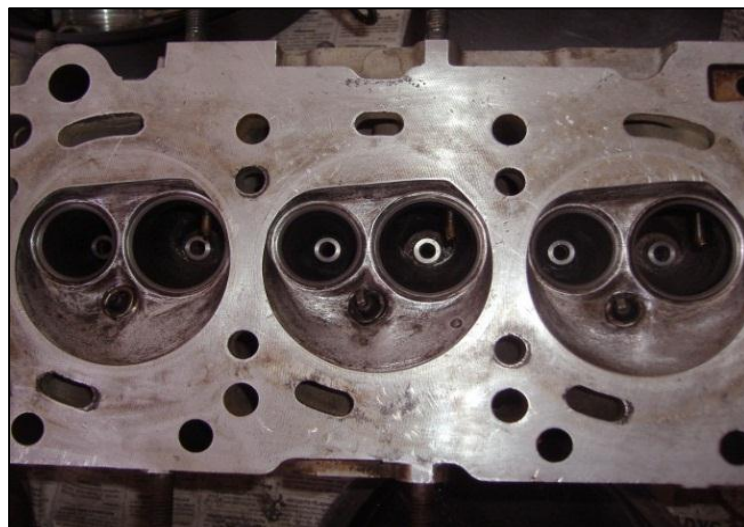


Fig. 4.8 Pruebas en el cabezote

### 4.6.3 Ductos

Se realizó una prueba visual determinando que los múltiples no presentan ninguna modificación respecto a su color, estado y presencia de hollín propia de su trabajo. En sus empaques respectivos no se observó cambios a ser tomados en consideración.

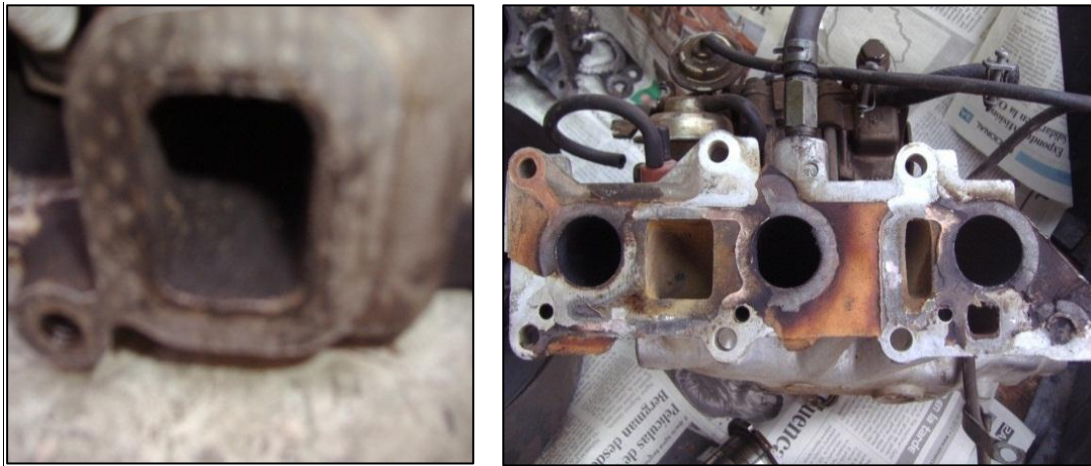


Fig. 4.9 Visualización de ductos de admisión y escape

### 4.6.4 Parte superior del pistón

En la parte superior del pistón podemos considerar que existe carbonilla propia de la combustión, pero no presenta sobrecalentamiento o picaduras. En cuanto a su empaque respectivo, se encontraba entero y en buenas condiciones

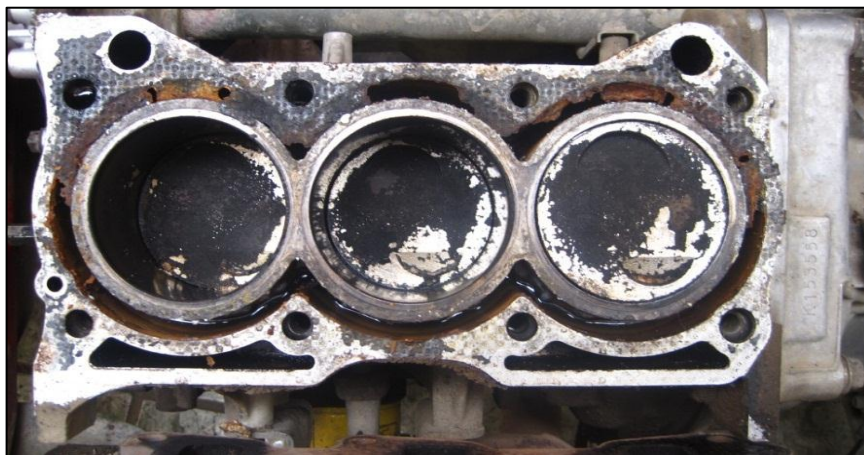


Fig. 4.10 Parte superior de la cabeza del pistón.



#### 4.7 Relación costo del equipo – dinero economizado en combustible

Es necesario averiguar si el ahorro de combustible que proporciona el equipo justifica el costo del mismo más su mantenimiento.

Elemento	Precio (USD)
Separador electrolítico	100,00
Depósito	9,00
Atrapa llama	7,50
Partes eléctricas y electrónicas	65,00
Soportes	40,00
Cañerías y elementos auxiliares	25,00
Otros	20,00

Tabla 4. 16. En términos generales el costos del equipo

Sumando todos los valores obtenemos que el costo estimado del equipo asciende a \$266,50. En condiciones normales, el vehículo en recorrido mixto nos daba un promedio de 11,86 km/l, mientras que con el aporte de hidrógeno el kilometraje se incrementó a los 13,94 km/l.

Mediante una regla de tres podemos determinar el porcentaje de ahorro de combustible:

$$11,86 \text{ km} \rightarrow 100\%$$

$$2,08 \text{ km} \rightarrow x\%$$

Donde el valor de 2,08 km corresponde a la diferencia entre el kilometraje final y el kilometraje inicial.

Despejamos la incógnita y obtenemos que  $x = 17,54 \%$

Esto significa que por cada 100 km recorridos en condiciones normales, con el empleo del hidrógeno se incrementan 17,54 km para una misma inversión económica, recorriendo un total de 117,54 km. Según los cálculos realizados en el punto 4.2, para un recorrido de 1000 km se consumen 150 cm<sup>3</sup>, lo que significa que para 100 km el consumo es de 15 cm<sup>3</sup>, que de acuerdo a los datos obtenidos tiene un costo de \$ 0,037.

Mediante otra regla de tres podemos encontrar el valor económico que le corresponde a los 17,54 km ahorrados. Consideramos que el costo por galón de combustible extra es de \$ 1,48. Multiplicamos la cantidad de litros consumidos por 3,785 y obtenemos el valor correspondiente a los kilómetros recorridos por el precio de un galón.

$$44,89\text{km} \rightarrow \text{USD } 1,48$$

$$17,54 \text{ km} \rightarrow \text{USD } x$$

Despejamos el valor de x, obteniendo: **x = USD 0,58**

A este valor se le resta el costo del hidrolito, quedándonos que se ahorra \$ 0,543. Esto significa que por cada 100 km recorridos, debido a la presencia de hidrógeno ahora ese kilometraje se lo recorre con USD 0,543 menos, o lo que es lo mismo, por cada kilómetro recorrido, se ahorran USD 0,00543. Podemos ahora encontrar el kilometraje que es necesario recorrer para lograr un ahorro correspondiente al valor del equipo:

$$\text{Kilometraje necesario} = \frac{\text{Costo del Equipo}}{\text{Costo ahorrado por kilómetro}}$$

$$\text{Kilometraje necesario} = \frac{\text{USD } 266,50}{\text{USD } 0,00543}$$

$$\text{Kilometraje necesario} = 49079,19 \text{ km.}$$

Este resultado indica que para recuperar el costo del equipo mediante ahorro de nafta, es necesario que se recorran 49079,19 km.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En base a los resultados obtenidos en los puntos anteriores, podemos decir que la adquisición del generador de hidrógeno se justifica económicamente a largo plazo, para nuestro caso, una vez que el automóvil haya recorrido 49079,19 km.
- Lo más importante es que con el empleo de este dispositivo se consigue una reducción significativa en el nivel de emisiones contaminantes, contribuyendo de esta forma a la preservación del medio ambiente.
- En cuanto al rendimiento del vehículo, no varía significativamente, como se puede apreciar en los puntos anteriores. La aceleración mejora mínimamente, mientras que la velocidad máxima alcanzada no se ve afectada.
- Por otra parte la vida útil de los componentes del motor no sufre un deterioro prematuro, ya que según los datos obtenidos, con el sistema de alimentación de hidrógeno se disminuye la temperatura y presión en los puntos del ciclo.

### Recomendaciones

Es muy importante tener presente que el hidrógeno es un combustible muy inestable, que puede arder en presencia de una fuente de ignición débil. A esto hay que añadirle el alto poder calorífico que posee y su elevada velocidad de propagación de la llama. Por todos estos motivos, y para un correcto funcionamiento del sistema, es necesario observar todas las medidas de seguridad posibles, entre ellas las siguientes:

- El armado del conjunto de celdas se lo debe hacer de manera muy precisa, teniendo en cuenta la distancia de separación de las placas de acero.
- El sellado del conjunto de celdas se lo debe hacer con resina acrílica de alta dureza, para garantizar la estanqueidad y el aislamiento eléctrico.
- El depósito y el atrapa llama deben ser contruidos de acuerdo a la capacidad del generador, y su estanqueidad debe ser perfecta.
- La instalación del sistema eléctrico se la debe realizar empleando los componentes adecuados de acuerdo a los requerimientos. El calibre de los cables, el tipo de relé y las demás conexiones deben ser determinados.

- La concentración de hidrolito en el agua destilada debe ser también la precisa, ya que de esto depende el amperaje de funcionamiento del sistema.
- Una vez que se ha realizado el montaje de todos los componentes, se recomienda colocar el hidrolito en el depósito hasta el nivel indicado, de manera que pueda abastecer al generador.
- Antes de activar el sistema de generación de hidrógeno, es recomendable que el motor del vehículo alcance su temperatura ideal de funcionamiento, es decir, una vez que hayan transcurrido 15 o 20 minutos desde el arranque.
- Durante el funcionamiento se puede verificar el amperaje consumido, con la finalidad de controlar la cantidad de hidrógeno producido.
- Revisar semanalmente el nivel de líquido del depósito y en caso que sea necesario, repostar hasta alcanzar el nivel indicado.

## GLOSARIO DE SIMBOLOS

$\eta_m$  = Rendimiento de la combustión

$Q$  = Energía calorífica del combustible (cal/kg\*°C)

$C_{vm}$  = Calor específico medio a volumen constante. (cal/kg\*°C)

$C_d$  = Coeficiente de dilución.

PCI = Poder calorífico inferior.

AC = Relación estequiométrica.

$C_v$  = Volumen constante,

$C_p$  = Presión constante.

$R$  = Constante de gas,

$K$  = Razón de calores específicos.

$N$  = Potencia (CV)

$P_{me}$  = Presión media efectiva (kg/cm<sup>2</sup>)

$V_t$  = Volumen total (l)

$n$  = Revoluciones por minuto (rpm)

$\eta_t$  = Rendimiento térmico

$R_c$  = Relación de compresión

$k$  = Relación de calores específicos

$S$  = Sección del cable (m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = Resistividad del cobre ( $\Omega \cdot m$ )

$L$  = Largo del conductor (m)

$I$  = Intensidad de corriente que pasa.

$\Delta V$  = Caída de tensión en el conductor.

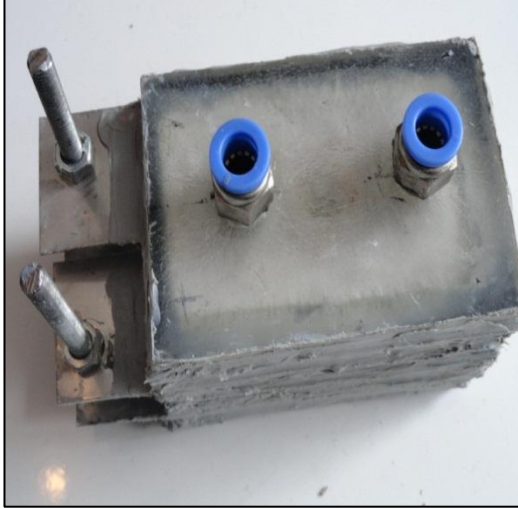
$m$  = Masa (g)

## BIBLIOGRAFÍA

- MILLARES DE IMPERIAL Juan. Turbo, Sobrealimentación de motores rápidos. España. Ceac. 2002. Octava edición.
- FISICANET. 2010. Leyes de la Electrolisis. [ en línea ] Argentina. <<http://www.fisicanet.com.ar/química/Electrolisis>> [consulta 30 de junio de 2011].
- ECURED. 2011. Electrolizador para la generación de Hidrógeno. [en línea]. Cuba. <<http://www.ecured.cu/index.php/Co>> [consulta 27 de mayo de 2012]
- SLIDESHARE. 2009. Energías Renovables. [en línea]. Colombia <<http://www.energias-renovables>> [consulta 8 de mayo 2011].
- LINARES José, MORATILLA Beatriz. 2009. El Hidrogeno y la Energía. Primer Edición. Editado por la Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI. España. Pp 44.
- YUNUS A. CENGEL, Michael A. Boles 2007 – Termodinámica – University of Nevada, North Carolina State University – cuarta edición.
- GIL MARTINEZ Hermógenes. 2003. Manual del Automóvil, reparación y mantenimiento: El motor a gasolina. Cultural. Madrid.
- HUBERT Lumbroso. 2005. Termodinámica. Editorial Reverte SA.
- LENNTECH. 2011. Termodinámica [en línea]. España. <[http://www.alegsa.com.ar/definición /de termodinámica.php](http://www.alegsa.com.ar/definición/de%20termodinámica.php)> [consulta 27 de abril de 2012]
- ECURED. 2011. Electrolizador para la generación de Hidrógeno. [en línea]. Cuba. <<http://www.ecured.cu/index.php/Co>> [consulta 27 de mayo de 2012].
- UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUNYA. 2009. Propiedades del acero inoxidable. [en línea]. España. [consulta 21 de junio de 2012]. <<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/4/55868-4.pdf>>
- MOTORES DE HIDROGENO. 2011. [en línea]. Alemania <http://es.scribd.com/doc/7329644/Motores-de-Hidrogeno>  
<http://es.scribd.com/doc/35980647/Hidrogeno-Como-Combustible>. [consulta 23 de junio de 2012].

## ANEXOS

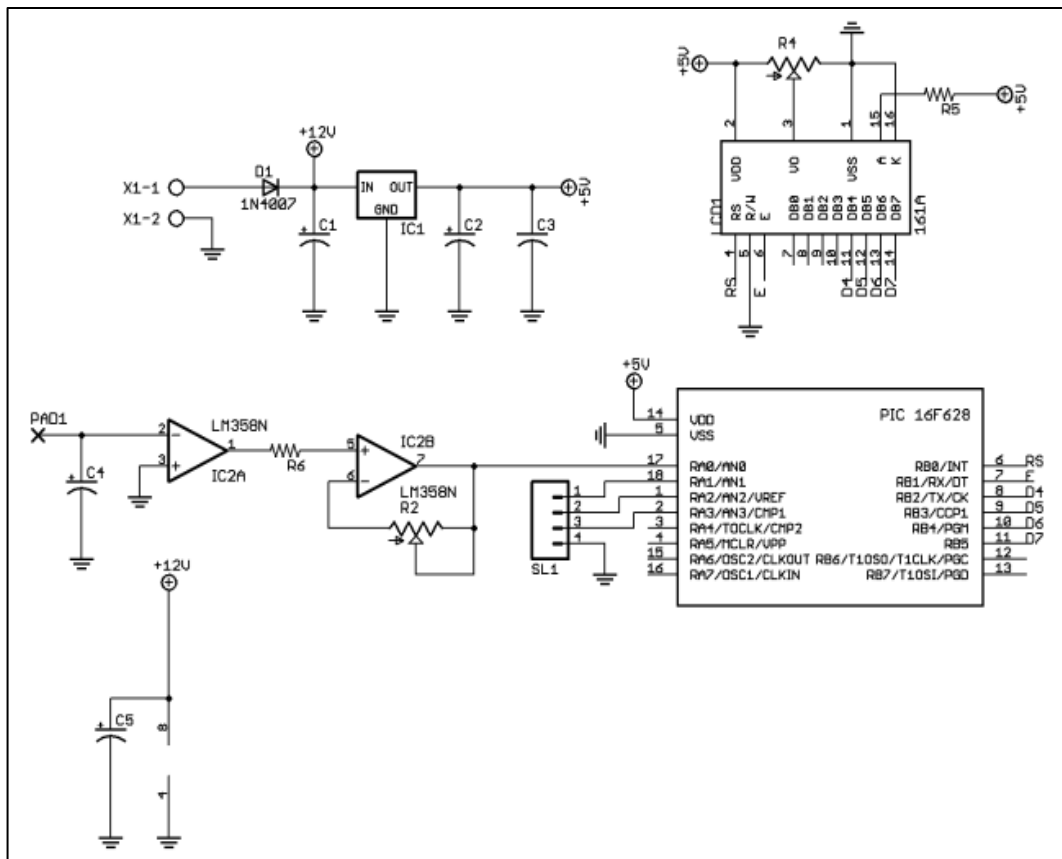
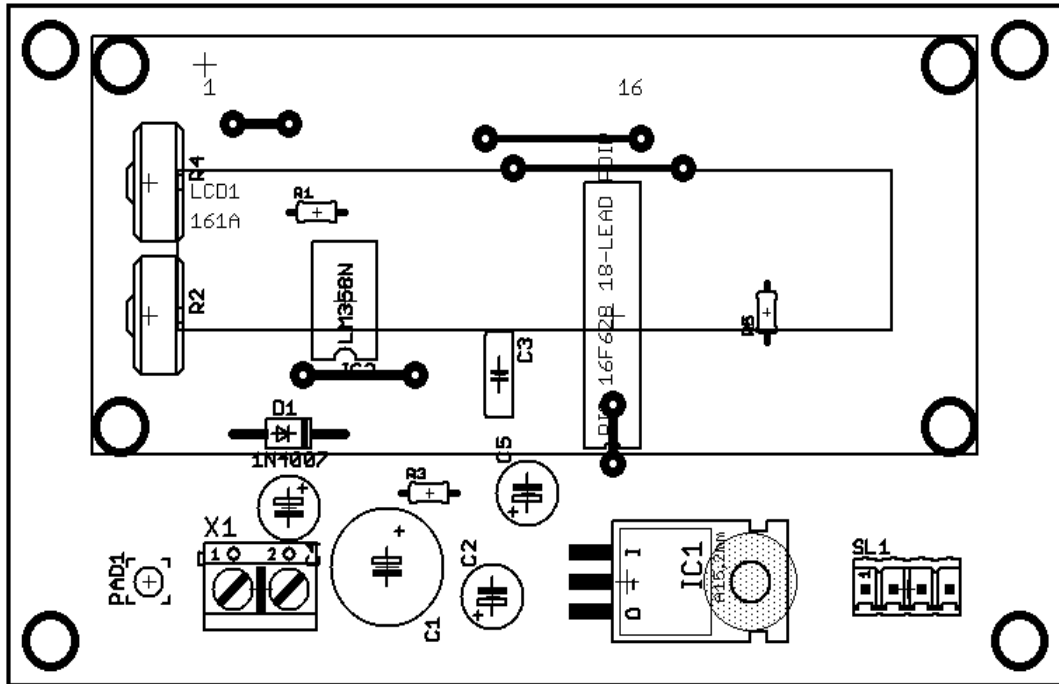
Anexo 1: Fotografías construcción del generador electrolítico



Anexo 2: Pruebas de funcionamiento en carretera con el sistema mixto



Anexo 3: Amperímetro placa electrónica





Anexo 4: Niveles de trabajo del generador en función de su amperaje



Anexo 5: Distribución de las partes del sistema de alimentación de hidrógeno



Anexo 6: Prueba de emisiones en el vehículo con un analizador de gases

COMBUSTIBLE NAFTA	
1000 RPM	2500 RPM
4 Gas Emission Analyzer	4 Gas Emission Analyzer
----- 2012/08/02 PM 4:11 CAR NUMBER: 0000 CO : 0.17 % HC : 229 ppm CO2 : 12.1 % O2 : 4.71 % LAMBDA: 1.242 AFR : 18.2 FUEL : GASOLINE H/C : 1.8500 O/C : 0.0000 -----	----- 2012/08/02 PM 4:04 CAR NUMBER: 0000 CO : 3.52 % HC : 187 ppm CO2 : 13.7 % O2 : 0.18 % LAMBDA: 0.909 AFR : 13.3 FUEL : GASOLINE H/C : 1.8500 O/C : 0.0000 -----

SISTEMA MIXTO	
1000 RPM	2500 RPM
4 Gas Emission Analyzer	4 Gas Emission Analyzer
----- 2012/08/02 PM 4:02 CAR NUMBER: 0000 CO : 0.15 % HC : 144 ppm CO2 : 13.3 % O2 : 3.08 % LAMBDA: 1.144 AFR : 16.8 FUEL : GASOLINE H/C : 1.8500 O/C : 0.0000 -----	----- 2012/08/02 PM 4:12 CAR NUMBER: 0000 CO : 2.81 % HC : 174 ppm CO2 : 13.5 % O2 : 0.21 % LAMBDA: 0.926 AFR : 13.6 FUEL : GASOLINE H/C : 1.8500 O/C : 0.0000 -----