

**UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y  
AMBIENTAL**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y  
ELÉCTRICA**



**“FACTIBILIDAD ECOLÓGICA DE CONVERTIR UN MOTOR DE  
COMBUSTIÓN DE GASOLINA A HIDRÓGENO”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

Para optar el Título Profesional de

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

GOÑAS MENDOZA. JAMES ERIK

**Villa El Salvador  
2016**

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis compañeros de estudios, con los que he compartido proyectos a lo largo de toda la carrera universitaria.

## AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mis padres por su apoyo durante los cinco años de mi carrera universitaria, quienes con sus consejos me enseñaron que nunca se debe dejar de luchar por lo que se desea alcanzar.

## **INDICE.**

Introducción.....	9
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>10</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....</b>	<b>10</b>
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA. ....	10
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.3. DELIMITACION DE LA INVESTIGACION. ....	11
1.3.1. CONCEPTUAL.....	11
1.3.2. ESPACIAL.....	11
1.3.3. TEMPORAL.....	11
1.4. FORMULACION DEL PROBLEMA. ....	12
1.4.1. Problema Central.....	12
1.4.2. Problemas Específicos.....	12
1.5. OBJETIVOS.....	12
1.5.1. OBJETIVOS GENERALES. ....	12
1.5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	13
Capítulo II .....	14
<b>2. MARCO TEORICO. ....</b>	<b>14</b>
2.1. ANTECEDENTES.....	14
2.1.1. Los Vehículos de hidrógeno. ....	14
2.1.2. Motores de Combustión Interna a Base de Hidrógeno (ICE- H <sub>2</sub> ).....	15
2.1.3. Métodos de Introducción del Hidrógeno en el Motor. ....	16
2.1.3.1. Enriquecimiento con hidrogeno o carburación.....	16
2.1.3.2. Sistema de inyección por conducto o en el colector.....	16
2.1.3.3. Inyección directa. ....	18
2.1.4. Emisiones en los Motores Funcionando con Hidrógeno y con el uso Sistema Bi-Fuel Hidrógeno-Diesel.....	19
2.2. BASES TEORICAS.....	20
2.2.1. Motor de Combustión Interna – Otto 4T.....	20
2.2.2. Relación de compresión de un motor Otto a hidrogeno. ....	21

2.2.3.	Contaminación del Aire. ....	22
2.2.4.	Gases Contaminantes del Aire Generados por la Combustión de Combustibles.....	23
2.2.4.1.	Monóxido de carbono.....	23
2.2.4.2.	Óxido de Azufre.. ..	24
2.2.4.3.	Hidrocarburos.....	25
2.2.4.4.	Óxido de Nitrógeno.....	27
2.2.5.	El Hidrogeno.....	27
2.2.6.	Estado Natural del Hidrogeno.....	28
2.2.7.	El Hidrogeno como Energético.....	29
2.2.8.	El hidrogeno como combustible.....	29
2.2.9.	Producción de hidrógeno.....	31
2.2.10.	Tecnologías de Producción de Hidrógeno en etapa embrionaria, en experimentación y desarrollo. ....	31
2.2.10.1.	Tecnologías de descomposición de agua.. ..	31
2.2.10.2.	Nanotecnología de películas fotoactivas de óxido de hierro.....	32
2.2.11.	Tecnología para la Producción de hidrógeno por descomposición de una sustancia. ....	33
2.2.11.1.	Electrolisis.....	33
2.2.11.2.	Termólisis.....	34
2.2.11.3.	Fotólisis.....	36
2.2.11.4.	Plasmólisis.....	37
2.2.11.5.	Craqueólisis.. ..	38
2.2.12.	Tecnologías para la Producción de Hidrógeno a partir de Combustibles Fósiles. ....	39
2.2.12.1.	Gasificación del Carbón.....	40
2.2.12.2.	Pirolisis. ....	41
2.2.12.3.	Procesos de Oxidación Parcial de los Hidrocarburos. ....	41
2.2.12.4.	Proceso Kvaener y Reformado Mediante Plasma. ....	42
2.2.13.	Almacenamiento del Hidrógeno.....	42
2.2.13.1.	Estado Gaseoso.....	44
2.2.13.2.	Estado Líquido.....	45
2.2.13.3.	Estado Sólido.....	45

2.2.14. Transporte y Distribución del hidrógeno. ....	46
2.2.14.1. Transporte de hidrógeno gas.....	46
2.2.14.2. Transporte de Hidrógeno líquido.....	47
2.3. MARCO CONCEPTUAL. ....	47
Capitulo III .....	50
3. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA.....	50
3.1 Descripción del Proyecto. ....	50
3.1.1. Esquema de conversión de un motor de combustión de gasolina a hidrogeno. ....	51
3.1.2. El Proceso de Combustión convencional.. ....	52
3.1.3. El Proceso de combustión con hidrógeno.....	54
3.2. Resultados.....	55
4. Conclusión. ....	57
5. Recomendación.....	58
Bibliografía.....	59

## TABLA DE CONTENIDO DE CUADROS

<b>CUADRO 1:</b>	<b>Cuadro de octanajes de los combustibles.....</b>	<b>22</b>
<b>CUADRO 2:</b>	<b>Chispas de hidrogeno a diferentes presiones.....</b>	<b>30</b>
<b>CUADRO 3:</b>	<b>Cuadro de presupuestos.....</b>	<b>51</b>
<b>CUADRO 4:</b>	<b>Cuadro comparativo del hidrogeno con respecto de la gasolina.....</b>	<b>55</b>

## TABLA DE CONTENIDOS GRÁFICOS

<b>GRÁFICO 1:</b>	<b>Motor de ciclo Otto.....</b>	<b>21</b>
<b>GRÁFICO 2:</b>	<b>Diagrama P-V de un motor Otto .....</b>	<b>21</b>
<b>GRÁFICO 3:</b>	<b>Tanque de hidrogeno liquido.....</b>	<b>43</b>
<b>GRÁFICO 4:</b>	<b>Esquema de inyección de hidrogeno.....</b>	<b>51</b>

## Introducción

El presente trabajo de investigación, describe la factibilidad ecológica de convertir un motor de combustión de gasolina a hidrogeno. A si mismos se plantea una solución a este problema de contaminación al sustituir a la gasolina por el hidrógeno, debido a que este elemento en la combustión solo produce agua en estado líquido y vapor.

En el capítulo uno, “planteamiento del problema”; trataremos sobre los gases contaminantes que se producen por la combustión de la gasolina y el empleo del hidrogeno como un combustible más limpio. El capítulo dos, mencionaremos algunos avances del uso del hidrogeno en los automóviles, las formas de introducir el hidrogeno como combustible en los motores de combustión, la producción, almacenamiento y distribución de este combustible. Así mismo trataremos algunos temas sobre contaminación y sus consecuencias.

En el último capítulo se basa en la demostración de que el hidrógeno como combustible genera menos gases contaminantes en comparación de la gasolina, esto será posible a los cálculos estequiométrico que se presentan en este capítulo.

## **CAPÍTULO I**

### **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

#### **1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.**

Los motores de combustión interna a gasolina generan gases tóxicos como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{NOX}$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), que generan contaminación ambiental y produce como consecuencia el calentamiento global (1).

Estos gases también afectan a la salud de las personas. El monóxido de carbono en concentraciones altas y tiempos largos de exposición puede provocar en la sangre la transformación irreversible de la hemoglobina, molécula encargada de transportar el oxígeno desde los pulmones hasta las células del organismo, en Carboxihemoglobina, incapaz de cumplir esa función. Por eso, concentraciones superiores de  $\text{CO}$  al 0.3% en volumen resultan mortales (2)

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.**

En la actualidad los motores de combustión que usan combustibles fósiles contaminan el medio ambiente, ante esto se busca combustibles ecológicos menos contaminantes, uno de ellos es el hidrógeno. El hidrógeno, como es sabido es un gas incoloro, inodoro y completamente inofensivo. Es 14,4 veces más ligero que el aire y condensa a  $-252,77\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Proporciona, al quemarse, una energía más alta que el resto de combustibles. Las emisiones nocivas en la combustión de hidrógeno con aire en motores y turbinas resultan insignificantes. El único producto de la combustión es el agua cuando el comburente es oxígeno puro (3).

Estas características hacen del hidrógeno un combustible más favorable para proteger nuestro planeta.

## **1.3. DELIMITACION DE LA INVESTIGACION.**

### **1.3.1. CONCEPTUAL.**

El uso del hidrógeno como combustible es una nueva tecnología, su aplicación en el parque automotor es aproximadamente desde el 2010 y la información que existe sobre estos son muy escasos.

### **1.3.2. ESPACIAL.**

Se realizó en la Universidad Nacional Tecnológica de Lima sur.

### **1.3.3. TEMPORAL.**

Esta investigación se desarrolló de abril del 2014 a enero del 2015

## **1.4. FORMULACION DEL PROBLEMA.**

Los automóviles que se producen en la actualidad en su gran mayoría utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento, estos combustibles al combustionar en el motor generan gases contaminantes.

Los gases de escape del motor contienen, además de sustancias inocuas como vapor de agua (13.8%), dióxido de carbono (12.3 %) y nitrógeno (72.1 %), también otras sustancias nocivas para las personas y el medio ambiente como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxido de nitrógeno (NOX), todos estos forman un 1.1%, O<sub>2</sub> y gases nobles 0.7% (4).

**1.4.1. Problema Central.** Tratar de reducir la contaminación ambiental producida por el uso de la gasolina como combustible en los motores de combustión interna.

### **1.4.2. Problemas Específicos.**

**1.4.2.1.** Es factible la conversión de un motor de combustión de gasolina a hidrógeno.

**1.4.2.2.** Cuáles son los principales Gases contaminantes producidos por el uso de la gasolina.

## **1.5. OBJETIVOS.**

**1.5.1. OBJETIVOS GENERALES.** Demostrar que el hidrogeno en su uso como combustible en los motores de combustión generan menos gases contaminantes que la gasolina.

## **1.5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

- 1.5.2.1.** Demostrar que es factible la conversión de un motor de combustión de gasolina a hidrógeno.
- 1.5.2.2.** Demostrar que la combustión de Hidrogeno dentro de un motor convencional a gasolina, genera menos contaminación.

## Capítulo II

### 2. MARCO TEORICO.

#### 2.1. ANTECEDENTES.

**2.1.1. Los Vehículos de hidrógeno.** Un vehículo de hidrógeno es un vehículo de combustible alternativo que utiliza hidrógeno diatómico ( $H_2$ ) como su fuente de energía para propulsarse. Estos vehículos utilizan generalmente el hidrogeno en uno de estos dos métodos: combustión o conversión de pila de combustible. En la combustión, el hidrogeno se quema en un motor de explosión, de la misma forma que la gasolina. En la conversión de pila de combustible, el hidrogeno se convierte en electricidad a través de pilas de combustibles que mueven motores eléctricos – de esta manera, la pila de combustible funciona como una especie de batería (5).

**2.1.2. Motores de Combustión Interna a Base de Hidrógeno (ICE-H<sub>2</sub>)** El uso de hidrogeno para el transporte no depende sólo de celdas de combustible; el hidrógeno también puede quemarse en motores de combustión interna (ICE), semejante a los motores de gasolina actuales, pero modificados para ajustarse a las propiedades diferentes de combustión del hidrógeno. Este es una ruta prometedora a una primera demanda para el hidrogeno en el transporte. Es una opción de bajo riesgo y costo porque parte de la tecnología actual del vehículo permite un cambio progresivo hacia el hidrogeno. Hay una larga experiencia en los motores en los motores ICE que utiliza gasolina y diésel y esta experiencia puede ser adaptada al hidrogeno. Por tal razón, los ICE abastecidos de hidrógeno podrían alcanzar la madurez económica y técnica más pronto que los de celdas de combustible y podrían crear una primera demanda para el suministro y la distribución de hidrógeno que ayudaran a desarrollar las estaciones de combustible y la infraestructura de transporte. Varios fabricantes de vehículos trabajan el concepto ICE-H<sub>2</sub>, pero cada uno desarrolla diferentes tipos de vehículos con sus propias especificaciones. El costo adicional de producción de vehículos ICE-H<sub>2</sub> comparado con el de vehículos estándar ICE que quema hidrocarburos están entre 50 y 80%, suponiendo alguna mejora en la eficiencia térmica general del motor (6).

Referencia: Cristian F. Inyeccion de Hidrógeno como Potencial Mejora de lo Motores Actuales. Proyecto Final de Carrera. Barcelona: Univercidad Politecnica de Cataluña, Ingeniería Técnica Naval; 2010-2011

### **2.1.3. Métodos de Introducción del Hidrógeno en el Motor.**

**2.1.3.1. Enriquecimiento con hidrogeno o carburación.** Esta técnica consiste en el enriquecimiento del aire mediante un carburador Venturi/gas.

Además de resultar el método as simple, es el que mejor permite pasar de un motor de gasolina a hidrogeno. Otra ventaja que supone emplear la carburación en un motor de combustión interna de hidrógeno es que 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 pre encendido y retroceso de llama. Asimismo, a mayor cantidad de mezcla aire/hidrógeno dentro del conducto de admisión agrava los efectos del pre encendido (7).

**2.1.3.2. Sistema de inyección por conducto o en el colector.**

El hidrógeno puede ser inyectado en el conducto de admisión usando inyectores, ya sea operados mecánicamente o electrónicamente. Si los inyectores son accionados mecánicamente, se podría hablar de sistemas de inyección a volumen constante (CVI, Constant Volume Injection). Estos sistemas utilizan un dispositivo mecánico accionado por levas para elegir el instante en el cual se debe inyectar hidrogeno en cada cilindro. Los inyectores electrónicos, por su parte, tienen un diseño más robusto con un mayor control sobre los tiempos de inyección y su duración. Además,

resultan más adecuados para funcionar en condiciones de alta velocidad.

Cuando se utiliza sistemas electrónicos para el control de los momentos de inyección se habla de sistemas de inyección electrónica de combustible (EFI, Electronic fuel injection) este tipo de inyector calcula la cantidad de hidrógeno que debe introducirse en cada cilindro.

Este sistema utiliza inyectores electrónicos de combustible individual (válvulas solenoides) para cada cilindro. Mientras que el sistema CVI utiliza la sincronización constante y una presión variable en el conducto del combustible, los sistemas EFI utilizan una sincronización variable y una presión constante en dicho conducto.

La posición de los inyectores en el colector o conducto determinara si el tipo de introducción del carburante en el cilindro se trata de un PFI o un MFI (Port fuel injection o Manifold fuel injection system).

Se trata de un PFI si se realiza la inyección justo en los orificios antes de la válvula de admisión de cada cilindro del motor. Por otro lado, los sistemas MFI inyectan el H<sub>2</sub> bastante antes de la válvula, en el colector anterior a los conductos individuales de cada admisión, donde se repartirá la mezcla hacia los cilindros posteriormente.

Para ambos sistemas, fuente de encendido del hidrógeno serán combustible diesel o éter. La presión de suministro a la entrada por el orificio de admisión tiende a ser mayor que en un sistema de carburación o en un sistema de inyección central, pero menor que en los sistemas de inyección directa. Otra de las ventajas de la inyección frente a la carburación es que los tiempos de inyección son más adecuados, pudiéndose

eliminar los problemas de pre encendido y el retorno de llama. Esto es debido a que normalmente, el combustible se inyecta en el conducto después del inicio de la carrera de admisión, de esta manera se reducen las posibilidades de que se produzca el pre encendido del hidrogeno, ya que el aire que haya entrado a la cámara de combustión habrá enfriado algo el recinto y por consiguiente todos aquellos puntos o zonas calientes que pudieran comportarse como fuente de ignición. En este sistema, el aire se suministra al motor por separado al inicio de la carrera de admisión, para, como ya se ha mencionado anteriormente, diluir los gases residuales y refrescar cualquier punto caliente que haya podido quemar. Puesto que en el conducto de admisión habrá menos gas (aire o hidrogeno) en cualquier instante, cualquier pre encendido que se produzca será mucho menos grave (8).

**2.1.3.3. Inyección directa.** En los sistemas de inyección directa, el hidrogeno es inyectado directamente dentro de la cámara de combustión con la presión requerida al final del tiempo de compresión. Como el hidrogeno tiene una difusión rápida la mezcla de hidrogeno de enciende instantáneamente. Suele ser un sistema que usa para el encendido tanto la compresión como bujías. Mediante la inyección directa se obtiene rendimientos mayores que con los sistemas Port injection y los Manifold, siendo el que mayor eficiencia tiene. Existen dos tipos de inyectores usados en los sistemas de inyección directa. Uno de ellos es el inyector directo de baja presión o LPDI (low-pressure direct injector) y el otro es el inyector directo de alta presión o HPDI (high-pressure direct injector). Los inyectores de baja presión

inyectan el combustible tan pronto como la válvula de admisión se cierra y la presión es baja en el interior del cilindro, mientras que los de alta presión realiza esta inyección al final de la carrera de compresión. El mayor problema relacionado con el uso de los sistemas de inyección directa es que este debería poder soportar una temperatura de combustión muy alta, para así evita la corrosión del inyector debido a los gases de escape. La lubricación de este tipo de inyector también hace más complicada la implementación de estos (9).

**2.1.4. Emisiones en los Motores Funcionando con Hidrógeno y con el uso Sistema Bi-Fuel Hidrógeno-Diesel.** Son cuatro las emisiones significantes de los motores de encendido por compresión. Estas son los hidrocarburos (HC), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Un motor utilizando parcialmente hidrógeno como combustible reduce parcialmente la producción de óxidos de carbono, debido a que el hidrógeno no contiene carbono. Sabiendo que hoy en día la mayoría del hidrógeno producido es mediante reformado de combustible que contiene carbono, la generación de este hidrógeno mediante fuentes renovables como la energía eólica y solar sería capaz de reducir estas emisiones a valores cercanos a cero. En pruebas de un motor de hidrógeno no se generaron emisiones significantes emisiones de CO y CO<sub>2</sub> en la combustión del hidrógeno. Las emisiones que se midieron fueron debidas al lubricante en las paredes del cilindro. De la misma manera, el producto de una completa combustión de hidrógeno es completamente agua. Los NOx, por su parte, son un problema para los motores que usan hidrógeno como combustible mediante encendido por compresión. Aun así, se han registrado descensos en estas emisiones operando un motor

con hidrógeno y diesel (siendo el hidrógeno el combustible principal), respecto al uso de diesel solamente (10).

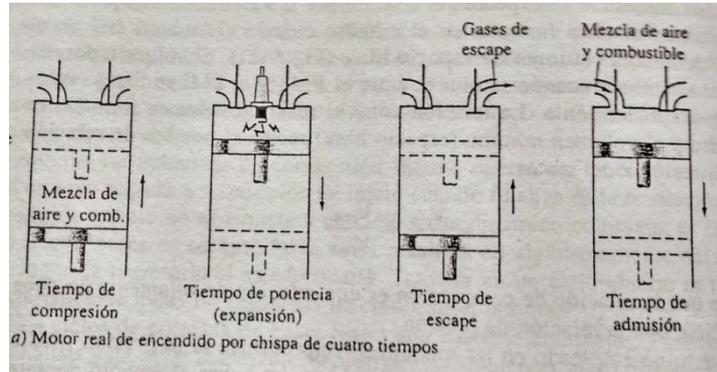
## **2.2. BASES TEORICAS.**

**2.2.1. Motor de Combustión Interna – Otto 4T.** El ciclo de Otto es el ciclo ideal para la maquinas reciprocantes de encendido por chispa. Recibe ese nombre en honor a Nikolaus A. Otto, quien, en 1876, en Alemania, construyo una exitosa máquina de cuatro tiempos utilizando el ciclo propuesto por Frenchman Beau de Rochas en 1862. En la mayoría de las maquinas encendidas por chispa el embolo ejecuta cuatro tiempos completos (dos ciclos mecánicos) dentro del cilindro, y el cigüeñal completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico. Estas máquinas son llamadas máquinas de combustión interna de cuatro tiempos. Un diagrama esquemático de cada tiempo, así como el diagrama P-V para una maquina real de encendido por chispa de cuatro tiempos se presenta en la figura 1 y 2.

Inicialmente, tanto la válvula de admisión como la de escape están cerradas y el embolo se encuentra en su posición más baja (PMI). Durante la carrera de compresión, el embolo se mueve hacia arriba y comprime la mezcla de aire combustible. Un poco antes de que el embolo alcance su posición más alto (PMS), la bujía produce una chispa y la mezcla se enciende, con lo cual aumenta la presión y la temperatura del sistema. Los gases de alta presión impulsan el embolo hacia abajo, el cual a su vez obliga a rotar al cigüeñal, lo que produce una salida de trabajo útil durante la carrera de expansión o carrera de potencia. Al final de esta carrera, el embolo se encuentra en su posición más baja (la terminación del primer ciclo mecánico) y el cilindro se llena con los productos e la combustión. Después el embolo se mueve hacia arriba una

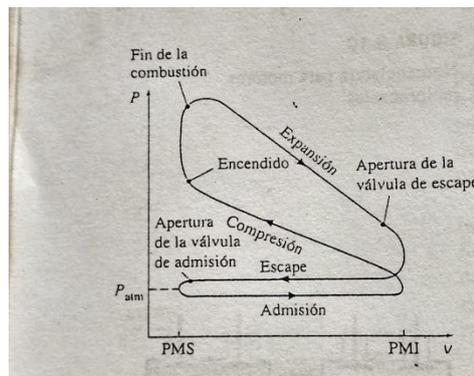
vez más y evacua los gases de escape por la válvula de escape (carrera de escape) (11).

Figura 1 Motor de ciclo Otto (11).



Fuente: Termodinamica pag. 500 (11)

Figura 2 Diagrama P-V de un motor otto



Fuente: Termodinamica pag. 500 (11)

**2.2.2. Relación de compresión de un motor Otto a hidrogeno.** Un factor determinante en la potencia de un motor es su relación de compresión no el octanaje. Es decir, a mayor relación de compresión mayor será la potencia del motor y mayor será el octanaje. En otras palabras, el octanaje se denomina en el momento de diseño en función a la relación de compresión que se dé al motor y no al contrario. En la tabla 1 se puede apreciar el número de octanaje para algunos combustibles (12).

**CUADRO 1.** Cuadro de octanajes de los combustibles.

<b>Combustible</b>	<b>Numero de octanos</b>
Hidrogeno	130
Metano	125
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Diésel	30

Fuente: altereco21.org (13)

De la relación de compresión de los motores de gasolina es de 7:1 a 12:1, en un trabajo que se realizó para demostrar la capacidad de un sistema de inyección de combustible de puerto de hidrogeno resulto que la relación de compresión para el hidrogeno varían entre 19:1 a 24:1, esto se debe a que contiene más octanaje que la gasolina (14).

**2.2.3. Contaminación del Aire.** Si bien el planeta ha albergado a la humanidad desde hace poco más de 2 millones de años, el deterioro a causa del hombre se acentuó con el inicio de la revolución industrial, con la quema de combustibles fósiles y con el subsecuente aumento de las emisiones de gases de tipo invernadero, lo que ha ocasionado el calentamiento global (6).

Las partículas sólidas que existen en la atmosfera son generadas por la combustión de combustibles tales como el carbón y el combustóleo en hornos estacionarios y de la gasolina, aceite diesel y combustible para motores de turbina en fuentes móviles. Los procesos de fabricación como el molino, fundición, trituración y molienda de granos también contribuyen también contribuyen a la contaminación del aire.

La principal fuente de los óxidos de azufre proviene del consumo de combustibles que contengan azufre. Sin embargo, algunos compuestos de azufre son liberados a la atmósfera durante el procesamiento de minerales y de los procesos de fabricación que utilicen ácido sulfúrico. El monóxido de carbono es generado principalmente por la combustión incompleta de los combustibles carbonáceos no quemados en motores de automóviles y unidades de calefacción. Los hidrocarburos no quemados son el resultado de la combustión incompleta de los combustibles y durante la refinación del petróleo. Una porción relativamente pequeña proviene de otras operaciones como la limpieza en seco, la evaporación de capas industriales y la limpieza de las piezas manufacturadas. Los óxidos de nitrógeno se forman en un proceso de combustión cuando el nitrógeno del aire o en el combustible se combina con el oxígeno a elevadas temperaturas. Una muy pequeña cantidad de los óxidos es liberada en las plantas que emplean o fabrican ácido nítrico (15).

**2.2.4. Gases Contaminantes del Aire Generados por la Combustión de Combustibles.** A continuación, nombraremos los gases generados por la combustión de combustibles que contaminan nuestra atmósfera:

**2.2.4.1. Monóxido de carbono.** También denominado óxido de carbono (II), cuya fórmula química es CO, es un gas inodoro, incoloro y altamente tóxico. Puede causar la muerte cuando se respira a niveles elevados (mayor a 750 ppm (15)) (16). La combinación de monóxido de carbono conduce a la formación de la carboxihemoglobina COHb; la combinación del oxígeno y la hemoglobina producen la oxihemoglobina. Cuando

cesa la exposición, el CO que se combinó con la hemoglobina es liberado espontáneamente, y la sangre queda libre de la mitad de su monóxido de carbono, en pacientes saludables y en un periodo de 3 a 4 horas. Se mantiene en la sangre un nivel normal de COHb de 0.4 por ciento, por el CO producido dentro del cuerpo, independientemente de las fuentes externas (15).

**2.2.4.2. Óxido de Azufre.** El dióxido de azufre y trióxido de azufre son los óxidos dominantes del azufre presentes en la atmosfera. El SO<sub>2</sub> es un gas incoloro, no flamable y no explosivo que produce una sensación gustatoria a concentraciones de 0.3 y 1.0 ppm en el aire. A concentraciones mayores a 3.0 ppm, el gas tiene un olor acre e irritable. El dióxido de azufre se convierte parcialmente a trióxido de azufre o ácido sulfúrico y a sus sales mediante procesos fotoquímicos o catalíticos en la atmosfera. El trióxido de azufre forma ácido sulfúrico con la humedad del aire. Los compuestos de azufre son responsables de los daños más importantes ocasionados a los materiales. Lamentablemente, es difícil evaluar con precisión la contribución relativa de cada uno de los contaminantes individuales. Las observaciones indican que concentraciones de 1 a 2 ppm de SO<sub>2</sub> en la atmosfera son causas de un aumento de 50 a 100 por ciento en el tiempo de secado de una película de pintura, y concentraciones más altas de 7 a 10 ppm aumenta el tiempo de secado a 2 ò 3 días. También, la superficie final dura menos cuando la pintura se seca en presencia del SO<sub>2</sub>. Por lo general, los óxidos de azufre aceleran la corrosión del metal al formar primero ácido sulfúrico ya sea en la atmosfera o sobre la superficie del metal como los óxidos de azufre

tienden a presentarse en los mismos tipos de atmósfera contaminada con partículas y la alta humedad relativa, pocos estudios epidemiológicos han sido capaces de diferenciar adecuadamente los efectos de los contaminantes. Varias especies de animales incluyendo el hombre, reaccionan con broncoconstricción ante el  $\text{SO}_2$ ; este efecto sobre los bronquios se puede evaluar en términos de un ligero aumento en la resistencia en el conducto del aire. La mayoría de los individuos mostraron una reacción al  $\text{SO}_2$  a concentraciones de 5 ppm o mayores, y algunos individuos sensibles muestran ligeros efectos a 1 ó 2 ppm (15).

**2.2.4.3. Hidrocarburos.** Los hidrocarburos o compuestos orgánicos volátiles, pues ambas denominaciones se emplean de forma indistinta, son contaminantes primarios del aire y se emiten directamente a la atmósfera. Muchos de estos hidrocarburos evolucionan posteriormente transformándose en los llamados oxidantes fotoquímicos. Podemos afirmar que los efectos causados sobre los seres vivos o los materiales por los hidrocarburos son menores que los ocasionados por los oxidantes fotoquímicos, por lo que nos referimos fundamentalmente a estos últimos. En cualquier caso, es preciso indicar que los hidrocarburos en sí mismo pueden también resultar perjudiciales, siendo el umbral de toxicidad mucho más bajo para los aromáticos que para los alifáticos. A título indicativo, podemos señalar que los hidrocarburos alifáticos ejercen efectos nocivos a concentraciones en torno a 500 ppm, mientras que los aromáticos causan efectos semejantes a niveles de tan solo 25 ppm. Para estudiar los efectos de los

oxidantes fotoquímicos es conveniente distinguir entre plantas, animales (incluido el hombre) y materiales.

En las plantas, los oxidantes producen daños agudos y crónicos que se manifiestan en la aparición de procesos necróticos en las hojas y disminución del crecimiento y producción. La mayor parte de los estudios realizados se refieren al ozono, único oxidante medido actualmente de forma habitual en la atmosfera. En general, se puede afirmar que plantas como las espinacas, el tomate o el tabaco, especialmente sensibles a él, comienzan a deteriorarse cuando se ven expuestas a concentraciones de ozono de 0,05 ppm durante 4 h, o de 0.03 ppm durante ocho horas.

En cuanto a los animales y el hombre, el efecto producido se manifiesta, fundamentalmente, en una irritación de los ojos, pero no es éste el único que puede aparecer. Dependiendo una vez más de la concentración, tiempo de exposición y naturaleza del oxidante fotoquímico, pueden producirse dolores de cabeza, tos, irritación del aparato respiratorio, dolor de garganta o daños de mayor gravedad que pueden llegar a ser letales a concentraciones suficientemente elevadas.

En cuanto a los materiales, todos aquellos que contengan en su composición macromoléculas orgánicas, sean estas naturales o polímeros sintéticos, fundamentalmente si contienen doble enlaces en su esqueleto hidrocarbonado, son muy sensibles al ataque del ozono y a los oxidantes fotoquímico. El ataque de las especies oxidantes a los enlaces insaturados puede traducirse en una ruptura de los mismos, lo que conduciría a la fragmentación de las moléculas, con la que el material al disminuir el peso molecular promedio,

sufriría importantes cambios en sus propiedades, se volvería más fluido y perdería resistencia a la tensión (17).

**2.2.4.4. Óxido de Nitrógeno.** De los seis o siete óxidos de nitrógeno, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) son importantes contaminantes del aire. A pesar de que el N<sub>2</sub>O está por lo general presente en la baja atmósfera (formado por acción biológica en la superficie del terreno) no se considera como contaminante del aire. Ni el NO ni el NO<sub>2</sub> causan daños directos a los materiales; sin embargo, el NO<sub>2</sub> puede reaccionar con la humedad presente en la atmósfera para formar ácido nítrico que puede ser causa de considerable corrosión de las superficies metálicas. El dióxido de nitrógeno absorbe la luz visible y a una concentración de 0.25 ppm causara apreciable reducción de la visibilidad. El dióxido de nitrógeno a una concentración de 0.5 ppm en un periodo de 10 a 12 días ha detenido el crecimiento de las plantas tales como el frijol pinto y el tomate. Experimentos con naranjas sin semilla muestran que se reduce el rendimiento ante una prolongada exposición del NO<sub>2</sub> a concentraciones de 0.25 a 1 ppm. El NO<sub>2</sub> es solo potencialmente irritante y potencialmente relacionado con la fibrosis pulmonar crónica (15).

**2.2.5. El Hidrogeno.** El elemento número 1 de la tabla periódica no es un recurso energético en la actualidad, porque no existen reservas naturales de hidrogeno; sin embargo, tiene el enorme potencial para servir como un portador de energía, que por sus propiedades pudiera constituir un elemento clave y propiamente un combustible en los próximos años. La síntesis

y su preparación siguen y seguirán siendo realizadas principalmente a partir de los hidrocarburos fósiles. Sin embargo, estos, quizá muy pronto se agotarán y el hidrogeno sería el sustituto ideal cuando ello ocurra (6).

A medida que vemos que la investigación y experimentación con el hidrogeno corre a la velocidad de un reguero de pólvora, aumenta nuestro asombro por la amplísima variedad de modalidades que admite su tratamiento, tanto desde el punto de vista de la producción y distribución como de su empleo practico en las más variadas dedicaciones. No se puede evitar tampoco cierta sorpresa ante la lentitud con la que ha ido adquiriéndose esta evidencia, y forzoso es reconocer que parte de la culpa la tienen los informes contradictorios que algunos países productores de petróleo y gas natural emiten sobre sus reservas, tema que consideran estratégico, y por lo tanto manipulable.

Podría afirmarse que no hay rama de la sociedad del mundo contemporáneo que no resulte afectado por el empleo generalizado del hidrogeno, y por supuesto, en son beneficioso y enriquecedor. Tampoco cabe vacilar ante la esperanza de que cuanto más conocidas y populares sean sus formas de empleo, se multiplicaran más y más. Hemos vivido durante un siglo presos de la adicción al petróleo y los motores movidos por él y triste es decir que darán algún trabajo liberarse de semejante sugestión, pero lograrlo merece todos los esfuerzos y los recompensará con creces (3).

**2.2.6. Estado Natural del Hidrogeno.** El hidrogeno existe libre en pequeñas cantidades en la atmósfera (1 L de hidrogeno en 15 000 L de aire), en las emanaciones volcánicas, en pozos petrolíferos y gran parte de los cuerpos estelares. El sol tiene un porcentaje de hidrogeno (99%); debido a las elevadas temperaturas se producen en él fusiones nucleares, de

manera de que el hidrogeno se transforma en hielo y parte de la energía desprendida llega a la tierra. Se encuentra también en todos los ácidos, en los seres vivos, los azúcares, el papel, la madera, lana, seda, algodón, manteca, aceites, tejidos orgánicos, hidrocarburos y en compuestos minerales (6).

**2.2.7. El Hidrogeno como Energético.** La energía química del hidrogeno puede convertirse de manera directa en energía eléctrica, sin tener que disponer de un paso intermedio mediante accionamiento térmico de un ciclo de potencia, como sucede en las centrales generadoras de electricidad. Esta conversión química a energía eléctrica se lleva a cabo en las celdas de combustible. La energía eléctrica producida puede emplearse tanto con fines estacionarios, para el suministro industrial, comercial y doméstico, como para el transporte, mediante su uso en vehículos híbridos (eléctricos de hidrógenos) o simplemente a base de hidrogeno. La meta será lograr su empleo en aplicaciones portátiles, en la que la batería típica sería remplazada por un cartucho de hidrogeno o metanol y una celda de combustible en miniatura (6).

**2.2.8. El hidrogeno como combustible.** En la llamada economía del hidrógeno se vislumbra a este elemento como el combustible del futuro. Entre sus características combustibles cabe señalar que se quema en el aire libre cuando hay concentraciones de entre 4 y 75 % de su volumen, por lo que tiene la capacidad de arder en una mezcla pobres; con ello se consigue una mayor facilidad de arranque, con la combustión más completa y una mejor economía del combustible. Además, la temperatura final de combustión es menor, lo que reduce la formación de  $\text{NO}_x$ ; por su parte, el gas natural, que está formado por metano  $\text{CH}_4$ , se quema con concentraciones de entre 5.4 y 15 %. La temperatura para combustión

espontánea del hidrógeno es de 585 °C, mientras que para el gas natural es de 540 °C. El gas natural es mucho más explosivo que el hidrógeno, pues explota en concentraciones de 6.3 a 14%, en tanto el hidrogeno requiere concentraciones de 13 a 64 %. La energía mínima de la chispa corresponde a la ignición requerida para incendiar la concentración fácilmente inflamable del combustible del aire u oxígeno. En la tabla 2.2.8.1 muestra la mínima energía de la chispa del hidrogeno en aire para diferentes presiones (6).

**CUADRO 2.** chispa del hidrógeno a diferentes presiones.

Energía mínima de la chispa (MJ)	Presión (kPa)
0.017	101.3
0.090	501.0
0.560	20.3

Fuente: hidrógeno y energías renovables, pág.237, (6).

La energía mínima de la chispa requerida para incendiar el hidrógeno es inferior que la del metano (0.29 MJ) y la de la gasolina (0.24 MJ). Uno de los inconvenientes que presenta hoy el hidrogeno y que debe resolverse en el futuro inmediato con el desarrollo tecnológico es su baja densidad energética volumétrica (energía/volumen), que obliga a usar grandes recipientes de almacenamiento en vehículos pequeños y hace que la mezcla estequiometria aire/combustible con los cilindros del motor tenga un menor contenido energético, lo que produce, a su vez, una pérdida de potencia. Este factor también limita el contenido de hidrogeno en dicha mezcla, sin permitir que esta sea demasiado pobre. El uso de técnicas avanzadas de inyección del combustible o de hidrógeno líquido podría ser una solución para estos problemas (6).

Por último, debido al gran margen de inflamabilidad del hidrogeno comparado con otros combustibles, los motores de hidrogeno pueden trabajar con relación aire: hidrogeno desde 34:1, hasta 180:1 y como se requiere una mol de oxígeno para reaccionar con dos moles de hidrogeno su relación oxígeno: hidrogeno es de 1:16 (18). Por otro lado, la temperatura de combustión del hidrogeno es 2318 °C, (19) y de gasolina es de 2470 °C, como la temperatura de combustión del hidrogeno es menor a la de la gasolina no se necesita cambiar componentes del motor antiguo porque esta aguantara esta temperatura sin ningún problema.

**2.2.9. Producción de hidrógeno.** Como ya se ha dicho, el hidrogeno no se encuentra en un estado elemental libre en la naturaleza, por ello se denomina vector energético o portador de energía. Al igual que la electricidad, tiene que producirse a partir de otras fuentes energéticas: los hidrocarburos, el gas natural, el carbón, la biomasa o el agua, todos ellos con la aportación de energía. En el estado ideal, la energía aportada tiene que ser igual a la energía contenida en el hidrógeno sintetizado. Sin embargo, producir hidrógeno a partir de cualquier fuente implica un proceso de transformación de energía y, como se sabe, en el estado real las transformaciones de energía siempre tienen asociada una pérdida de energía (6).

**2.2.10. Tecnologías de Producción de Hidrógeno en etapa embrionaria, en experimentación y desarrollo.**

**2.2.10.1. Tecnologías de descomposición de agua.** El sistema Galio-Aluminio es un proyecto de la Universidad de Purdue, en Indiana, en la que el agua se descompone

directamente en hidrógeno y oxígeno sin necesidad de utilizar energía externa; únicamente haciendo fluir el agua a lo largo de una aleación compuesta por 80% de aluminio y 20 % de galio. El oxígeno se adhiere al aluminio y el hidrógeno burbujea, lo que permita su recolección. Tanto el aluminio (AL) como el galio (Ga) pertenecen a la familia IIIA, de elementos térreos, conocida como familia del aluminio. El galio es el elemento metálico que permanece en estado líquido en un margen de temperatura más amplio; cuando se congela, se expande como el agua. Tiene propiedades parecidas al aluminio, al formar óxidos y sales trivalentes, pero también forman algunos compuestos monovalentes y divalentes. Se oxida en el aire y en el agua; reacciona con los ácidos clorhídricos y nítrico, y se disuelve en soluciones alcalinas, desprendiendo hidrogeno (6).

**2.2.10.2. Nanotecnología de películas fotoactivas de óxido de hierro.** En Inglaterra, en la empresa Hydrogen Solar Ltd., se investiga la descomposición del agua en Hidrogeno y oxígeno, sin suministrar energía externa, para producir hidrogeno. El sistema se basa en celdas en arreglos modulares que pueden ensamblarse en cualquier tamaño. El óxido de hierro fotoactivo muestra una eficiencia de conversión de la luz del sol a hidrógeno de 2.1 %. Se espera incrementar de forma significativa la eficiencia, primero a nivel de prueba para después poder escalarlo.

**2.2.11. Tecnología para la Producción de hidrógeno por descomposición de una sustancia.** El nombre de los procesos para estas tecnologías incluye la parte del griego lisis, que remite el concepto de ruptura o separación, con el significado de descomposición por rompimiento de enlaces químicos. Consiste en una reacción química en la que de un compuesto se separan al menos otros dos. Dentro de este grupo hay tecnología en plena madures, otras en etapas de desarrollo y otras en estudio y fase experimental. Entre estas tecnologías se encuentran (6):

**2.2.11.1. Electrolisis.** En el proceso de electrolisis se requiere el suministro de electricidad a través de dos electrodos que deben ser sumergidos en agua con presencia de iones electrólitos para lograr la disociación del agua en hidrogeno y oxígeno puro. Actualmente esta tecnología estudia la electricidad generando por medio de una central termoeléctrica de ciclo combinado o turbogás. Por tanto, se dice que el hidrógeno obtenido es azul. Si la electricidad utilizada proviniese del viento o de celdas fotovoltaicas, que aprovechan la luz del sol, entonces se obtendría un hidrogeno verde, por el solo hecho de que al producirse no se generan emisiones de bióxido de carbono. La energía eólica ha demostrado que puede generarsuficiente electricidad sin contaminar; el inconveniente es que el viento no siempre produce la energía cuando se necesita. Cuando existan las condiciones favorables del viento, las electricidades generadas a través de los aerogeneradores se podrán utilizar para separar el hidrogeno. La ventaja que se tendría es que el hidrógeno se podría almacenarlo para utilizarlo como combustible propiamente cuando no existan las

condiciones de viento y los aerogeneradores estuvieran fuera de operación. Mediante la celda de combustible sería posible usar el hidrógeno producido para transformarlo en electricidad y con ello tener energía eléctrica en el hogar y como combustible para un vehículo. La molécula del agua es estable con respecto al oxígeno y el hidrógeno; para separar el hidrógeno del oxígeno, la reacción requiere energía; en principio, la reacción puede ocurrir si se aplica un voltaje de 1.23 V, que significa producir 237 kJ/mol de hidrógeno. En la práctica, se utilizan grandes voltajes (1.55 – 1.65 V) a causa de la cinética lenta en la mitad de dos celdas. La eficiencia de energía de la celda puede calcularse simplemente como el voltaje teórico (1.23 V) dividiendo entre el voltaje aplicado; por ejemplo, una celda que opera en 1.60 V tendría una eficiencia de  $1.23/1.60 \times 100\% = 77\%$ . De acuerdo con esto, la mínima cantidad de energía eléctrica necesaria para hidrolizar 1 mol de agua es 65.3 kW-h, por lo que producir 1 m<sup>3</sup> de hidrógeno requerirá 4.8 kW-h (6).

**2.2.11.2. Termólisis.** El proceso de termólisis implica la extracción del hidrógeno de la molécula del agua en forma de vapor, mediante la aplicación del calor a temperaturas por arriba de 2500 °C; existen algunos procesos que llegan a alcanzar temperaturas de 5000 °C para descomponer el agua en oxígeno e hidrógeno. Conforme a esta definición, la reformación del gas natural con vapor, la gasificación y la pirolisis se pueden entender como procesos termolíticos. La consideración de estos como métodos químicos o termolíticos dependen de una fuente de calor empleada. Lo anterior se entiende de la manera

siguiente: cuando el calor se extrae de un combustible a través de combustión es un método químico; por el contrario, se habla de procesos termolíticos cuando el calor procede de una fuente externa, como la energía solar concentrada o la energía nuclear de alta temperatura. Existen tres clases de procesos termolíticos, agrupados en función de la temperatura de operación. En la clase I, proceso que requiere mayor temperatura, el agua en forma de vapor se registra a partir de 2500 K; actualmente es poco práctico e inabordable por el alto costo de sus materiales requeridos en ciertos concentradores solares. Las altas temperaturas empleadas en este proceso obligan a seleccionar y especificar los materiales con el fin de que no existan problemas. Los procesos a temperatura intermedia, clase II, incluyen los de descarbonización, como la pirolisis, la gasificación y la reformación, situados todos alrededor de los 1000 K. Dentro de la clase II, las reacciones de reducción de óxidos metálicos se sitúan en un nivel superior de temperaturas, arriba de los 2500 K. Por último, se tienen los procesos de baja temperatura, entre 900 y 1000 K; en esta clase se verifican ciertos ciclos termoquímicos, uno de ellos, muy prometedor, es el de yodo-azufre. La tecnología podría basarse en concentradores solares para lograr la alta temperatura (con una potencia de 1000 kW), que poseen ventajas parabólicas dentro del calentador (a 4000 K), que sirvan principalmente para emplear el calor generado para la descomposición (6).

**2.2.11.3. Fotólisis.** Este proceso para la producción de hidrógeno se encuentra en etapa de desarrollo y fase experimental en la Universidad de Pensilvania. El proceso se basa en la descomposición del agua para producir hidrógeno y oxígeno; sin embargo, como utiliza la luz del sol se incluye en la presente sección para su estudio. El agua pura absorbe la radiación electromagnética en la región del infrarrojo (IR), razón por la cual se considera en forma de vapor o en los procesos de combustión como un gas invernadero. En esta región, la energía de los fotones es insuficiente para llevar a cabo la hidrólisis, por lo que es necesario agregar una molécula o un semiconductor capaz de absorber en otra región y permitir que se efectúe la reacción. Dado que la absorción de un fotón permite la transferencia de un electrón y que la reacción requiere dos electrones, será necesario utilizar, además, un catalizador para permitir el almacenamiento de los equivalentes electroquímicos. Mediante un catalizador combinado con un tinte naranja, que imita los procesos de oxidación del agua que se producen en los vegetales durante la fotosíntesis, se obtiene hidrógeno solo con agua y luz solar, con un rendimiento o eficiencia de 10 a 15%. Esta tecnología se basa en la nanotecnología; se han desarrollado fotoelectrodos a base de nanoestructuras de titanio que son económicos y presentan una larga vida y alta eficiencia para convertir la luz del sol en hidrógeno. Las nanoestructuras son excitadas por la luz solar, lo que produce grandes tensiones en el titanio, sobre la estructura cristalina y causa una sujeción de los electrones, por la que estos se debilitan en tal estructura y son expulsados fuera del titanio con luz de

menor energía, es decir, visible. Estos electrones, entonces, inducen la producción de hidrogeno, lo que se conoce como INGENIERÍA GAP y producen la fotocatalisis del titanio fotoactivo en el color azul visible y seis veces más eficiente respecto a la luz del sol que el titanio simple, que requiere escasa UV del espectro solar. El rendimiento del titanio mejora con la temperatura, así que el calor del sol puede incrementar la eficiencia del proceso de fotólisis, reduciendo costos. Es un proceso muy prometedor para una buena producción; es económico y requiere menos energía que otros procesos (6).

**2.2.11.4. Plasmólisis.** Un plasmatrón es un reformador que puede convertir varios combustibles en un gas de síntesis que contenga abundante hidrógeno, por la aplicación de la reformación por oxidación parcial. El calor del plasma y el calor interno de la reacción debido a la oxidación parcial se utiliza durante la reformación en el plasmatrón. A causa de su rápido inicio y tiempo de respuesta de pocos segundos, el proceso es aplicable a una gran variedad de razones de flujo y es especialmente útil para sistemas en pequeña escala, como el reformador en una celda de combustible residual, que requiere una rápida respuesta. El plasmatrón de alta temperatura fue diseñado para un reformador de producción de hidrógeno. En varios estudios experimentales se ha producido hidrógeno por la reformación de propano utilizando el plasmatrón en condiciones óptimas de operación para la producción de hidrógeno y máxima eficiencia de conversión de propano. Cuando un combustible derivado de combustible fósiles se quema en el aire,

aproximadamente 20 a 40 % de la energía se pierde para calentar los gases inertes en el aire. Estas pérdidas incluyen el calor que se gasta en los gases de combustión, que son eliminados por el quemado con el oxígeno coproducido. Los gases de combustión, en composición, contienen bióxido de carbono y vapor de agua. Inicialmente están calientes y pueden ser ionizados a un “plasma” conductor de corriente. La separación electrolítica del vapor de agua en el plasma da lugar a la tecnología de la plasmólisis (6).

**2.2.11.5. Craqueólisis.** Grandes son las cantidades de sulfuro de hidrogeno que se generan de los procesos de explotación, extracción y refinación del petróleo: alrededor de 200 000 ton/día a nivel mundial, principalmente como producto secundario indeseable del procesamiento de hidrocarburos, inclusive gas natural, petróleo y carbón. Tales gases son tratados típicamente con el proceso modificado de Claus para la recuperación de azufre. En los últimos años se ha investigado la producción de hidrógeno a partir del sulfuro de hidrógeno. A pesar de los avances logrados, ningún método de descomposición mediante la Craqueólisis del  $H_2S$  puede considerarse hoy comercialmente viable. Esta tecnología es reconocida ampliamente como el proceso más directo para convertir ácido sulfhídrico en hidrógeno y azufre, por la descomposición térmica (catalítica o no catalítica). Sin embargo, a causa de consideraciones de energía, este enfoque se ha considerado poco práctico industrialmente, ya que las temperaturas exceden aproximadamente  $927\text{ }^{\circ}C$  ( $127\text{ K}$ ). Además, es endotérmico; el equilibrio de la descomposición térmica

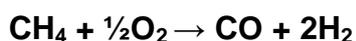
de  $H_2S$  en estas temperaturas es relativamente bajo. La conversión predicha de descomposición del  $H_2S$  se basó en el equilibrio termodinámico; la conversión es de aproximadamente 20% a 1000 °C y de 38% a 1200 °C. Se requieren temperaturas que exceden los 1 375 °C para manejar la reacción de descomposición de  $H_2S$  a conversiones > 50%. El proceso para la descomposición de un gas rico en sulfuro de hidrogeno incluye la mezcla con un volumen subestequiométrico de aire o aire enriquecido antes de entrar al reactor de descomposición. Los gases que abandonan el reactor son los productos de descomposición del  $H_2S$  (hidrógeno y azufre), al igual que algo de  $H_2S$  que no reacciona, vapor de agua, bióxido de azufre y algún otro contaminante. Los gases de salida deben enfriarse mediante un cambiador de calor con  $H_2S$  reciclado; los vapores de azufre deben removerse en un condensador convencional de azufre. Los gases que permanecen en la corriente de gas se separan en equipos especiales como el separador por membranas. El  $H_2S$  que no reacciona puede reciclarse para maximizar la conversión (6).

**2.2.12. Tecnologías para la Producción de Hidrógeno a partir de Combustibles Fósiles.** Sin el hidrogeno se obtiene a partir de un combustible fósil, como el petróleo, el carbón o el gas natural, de le denomina hidrógeno sucio o negro, porque su producción ha implicado la emisión de gases invernaderos a la atmósfera. Dentro de las tecnologías para la producción de hidrogeno a partir de combustibles fósiles, se encuentran (6):

**2.2.12.1. Gasificación del Carbón.** La gasificación del carbón es el proceso que se usa para producir un gas a partir del carbón, un llamado gas de síntesis (formado por una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, entre otros), a partir del carbón sólido. El proceso de gasificación consiste en la inyección del carbón con oxígeno y vapor de agua en una instalación llamada gasificador, con una temperatura de 700 y 1500 °C. Si el carbón es calentado mediante fuentes de calor externas el proceso se llama “gasificación alotérmica” y si se calienta simplemente mediante la reacción exotérmica de la reacción química se denomina “gasificación autotérmica”. El proceso que se produce en el gasificador es esencialmente una combustión con defecto de aire (10 a 50 % estequiométrico). Durante las reacciones mencionadas, el oxígeno y las moléculas de agua oxidan el carbón y producen una mezcla gaseosa de dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor de agua e hidrógeno molecular. El producto final es “syngas”, que en la mayoría de los casos es refinado aún más para obtener una mayor cantidad de hidrógeno puro. El proceso para la obtención de hidrógeno mediante este gas de síntesis es el reformado mediante vapor de agua convencional. Precisamente la gasificación de carbón con captura de CO<sub>2</sub> es una de las técnicas que despiertan mayor interés, tanto en la Unión Europea como en Estados Unidos, debido a que el recurso se halla muy repartido y a que cuando se integra esta técnica en ciclo combinado se puede producir de manera simultánea hidrógeno y electricidad, derivando la producción hacia el vector energético que más interese (7).

**2.2.12.2. Pirolisis.** La pirolisis consiste en la descomposición de un combustible sólido (carbón o biomasa) mediante la adición de calor en ausencia de oxígeno. El proceso requiere temperaturas de 1200 °C para el carbón y nos 450 °C para la biomasa. La producción de hidrógeno se produce a partir de un gas de síntesis como el proceso de gasificación constituido por CO y H<sub>2</sub>. Dicho proceso es aplicable también a residuos sólidos urbanos, obteniéndose hidrocarburos líquidos que una vez formados producen hidrogeno (7).

**2.2.12.3. Procesos de Oxidación Parcial de los Hidrocarburos.** El proceso consiste en oxidar el CH<sub>4</sub> de manera parcial (sin que se oxide en su totalidad), siguiendo la siguiente reacción:



La principal ventaja de este procedimiento es su compatibilidad con hidrocarburos líquidos, como el diésel y fuel oíl. Existen dos tipos de oxidación parcial, la oxidación parcial térmica (TPOX) y la oxidación parcial catalítica (CPOX). Las reacciones TPOX son dependientes de la proporción aire-combustible, y se lleva a cabo a unas temperaturas de 1200 °C o superiores. Mientras que las CPOX se usa un catalizador que reduce la temperatura requerida alrededor de los 800-900 °C. La elección de una u otra técnica depende de los contenidos de azufre que contiene el combustible a usar. CPOX se puede usar si el contenido de azufre es inferior a las 50 ppm. Si el contenido de azufre es mayor, este contaminaría el catalizador, así que se usara el tratamiento térmico (TPOX) para los combustibles ricos en azufre. Dicha

reacción se lleva a cabo con una eficiencia de alrededor del 70%. La presencia del CO no es conveniente así que se oxida para convertirlo en CO<sub>2</sub> o tratándolo con vapor de agua para generar más hidrogeno. Dado que la reacción es exotérmica no hace falta quemadores para mantenerla (7).

**2.2.12.4. Proceso Kvaener y Reformado Mediante Plasma.** El proceso Kvaener es un método reformado en 1994 por la empresa Kvaener Engineering para la producción de hidrógeno mediante hidrocarburos como metano, gas natural y biogás. El proceso para el separado de los hidrocarburos en sus componentes consiste en un quemador de plasma (arco eléctrico) a unos 1600 °C produciendo la siguiente reacción:

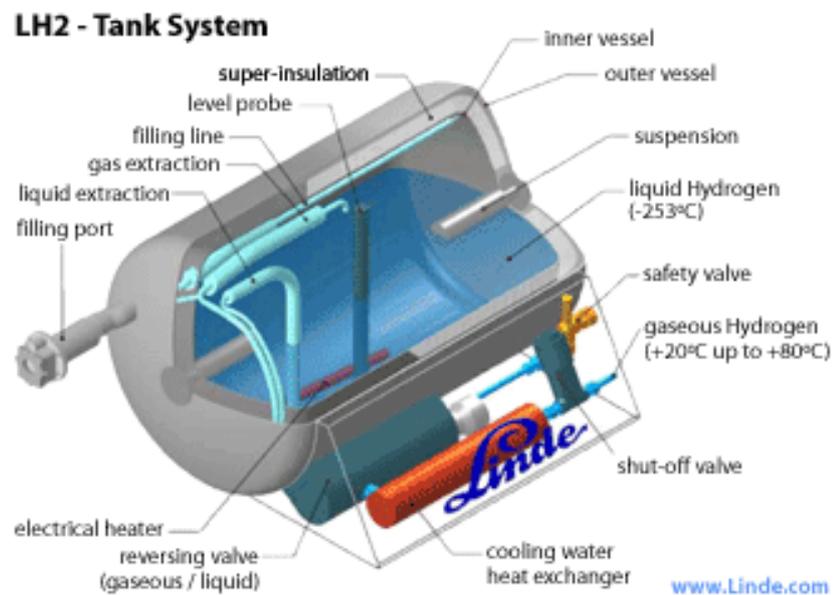


La mayor ventaja de este método sobre los otros métodos de reformado es que el gas natural se convierte en carbón e hidrógeno puros al 100% de una manera energéticamente eficiente. Por otro lado, el reformado mediante plasma es una variación del método anterior desarrollado en el año 2009. En este caso se substituye el quemador de plasma por un convertidor de plasma (7).

**2.2.13. Almacenamiento del Hidrógeno.** Uno de los grandes problemas es la utilización del hidrógeno es el almacenamiento de este. Esto se debe a que esta substancia tiene riesgos debidos en parte a la naturaleza explosiva del combustible y, por otro lado, a la presión a la que se contiene al hidrógeno en un recipiente en estado gaseoso. El

hidrogeno puede almacenarse en estado gaseoso, liquido o sólido. En la figura 3 se muestra un tanque de almacenamiento de hidrogeno en estado líquido para automóviles. Dependiendo del estado en el que se encuentran, se utilizan lo siguiente (7):

Figura 3. Tanque de hidrogeno liquido



Fuente: Madrimasd.com (20)

Súper –insulation	súper-aislamiento
Level prove	sonda de nivel
Filling line	línea de llenado
Gas extraction	extracción de gas
Electrical heater	calentador eléctrico
Reversing valve	válvula de inversión
Cooling water	agua de refrigeración
Shut off valve	válvula de cierre
Liquid Hydrogen	hidrogeno líquido
Cuter vessel	recipient exterior
Inner vessel	recipient interior

**2.2.13.1. Estado Gaseoso.** La técnica más sencilla para almacenar el hidrógeno es comprimiéndolo en fase gaseosa. Actualmente se almacenan a 200 bar, aunque mediante equipos avanzados se llega a los 700 bar. Una manera común hoy en día para el almacenamiento del combustible es a 350 bar en balas de materiales compuestos. Por lo que respecto al consumo, el gasto para elevar la presión del gas es elevado pero no es comparable al consumo para el procedimiento de licuefacción. A 200 bar se consume el 10% de la energía almacenada, mientras que a 700 un 15% de esta. Los tanques o cilindros usados para el almacenaje de gas hidrógeno a alta presión ( $\text{CGH}_2$ ) se pueden dividir en tipos: I, II, III, IV dependiendo de las características constructivas. Los cilindros de tipo I son de tanques de metal (acero o aluminio), que admiten una presión máxima de trabajo de 200 bares y de 175 bares para el aluminio. Los del tipo II también son metálicos, pero están reforzados por unos filamentos, generalmente fibra de vidrio o carbono. Son más ligeros que los anteriores y pueden trabajar aproximadamente hasta presiones de 263 bares los fabricados en aluminio y fibra de vidrio, mientras que los construidos en acero y carbono o aramida soportan presiones de hasta 299 bar. El tercer cilindro tipo III, está fabricado de materiales compuestos (carbono, fibra de vidrio o kevlar) y una fina capa metálica. Esta capa evita que fugue el hidrógeno, mientras que los materiales compuestos soportan los esfuerzos mecánicos. Pueden trabajar con presiones de hasta 305 bar para los de aluminio y fibra de vidrio y de 438 bar para lo de aluminio-kevlar. Finalmente, el de tipo IV está totalmente fabricado de materiales compuestos y es el

más ligeros de todos. Aun si presenta desventajas debido a la Difusividad del hidrógeno a través del polímero (7).

**2.2.13.2. Estado Líquido.** Para el almacenamiento líquido del hidrógeno este se enfría hasta su licuación a  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  a presión ambiente y debe mantenerse en tanques o cilindros criogénicos especiales. A esta temperatura su manipulación se complica, un aumento de presión producirá pérdidas por sobrepresión, por lo que su uso más bien está reservado a fines industriales. Si se reduce la presión disminuyen los riesgos. Por otra parte, el consumo energético de esta modalidad es muy elevada. Se considera una pérdida del 30% respecto a la energía almacenada a la que tendríamos de sumar las derivadas del aporte energético que hay que efectuar para mantener el hidrógeno en estado líquido (alrededor de 1 ó 2% diarios) (7).

**2.2.13.3. Estado Sólido.** El hidrógeno puede almacenarse en materiales especialmente diseñados para actuar como portadores de hidrógeno. El peso y el volumen de estos sistemas son elevados. Si bien generalmente a estos sistemas se les denomina almacenamiento en estado sólido en realidad estos sistemas almacenan el hidrógeno en estado gaseoso, en materiales mediante distintos mecanismos. Los mecanismos más conocidos para el almacenamiento de hidrógeno basados en materiales son dos: la adsorción, absorción. Los mecanismos de adsorción, el hidrógeno se une directamente a la superficie del material. Estos procedimientos requieren materiales altamente porosos para maximizar el área superficial disponible para la

adsorción del hidrógeno, además de para la liberación del hidrógeno con mayor facilidad. Las estructuras metalo-organicas (MOF), los clatratos y los hidruros químicos no reversibles son algunos de los materiales que funcionan con el mecanismo de adsorción. Además de la adsorción materiales como carbón ultra poroso. La absorción en cambio, consiste en la disociación de los átomos de hidrógeno y su posterior incorporación en la red del sólido, en el interior del material. Los sistemas que se utilizan para almacenar mediante absorción son los hidruros metálicos reversibles, los hidruros complejos y los sistemas de nitrógeno (7).

#### **2.2.14. Transporte y Distribución del hidrógeno.**

**2.2.14.1. Transporte de hidrógeno gas.** El hidrógeno gas suele ir comprimido en depósitos entre 200–700 bar. Los depósitos convencionales de gas comprimido a 200-350 bar son de acero austenítico. Para presiones superiores entre 400-700 bar se están desarrollando nuevos materiales compuestos de fibra de carbono y polímeros o bien de aluminio reforzado con fibra de carbono. Estos depósitos se pueden transportar por carretera en camiones, ferrocarril o barco. Los camiones tipo tráiler para gas comprimido tienen un alto costo variable debido al bajo volumen de hidrógeno que transportan y a la distancia a recorrer. En cambio, los gastos fijos son bajos y flexibles. Esto implica que cuando la distancia al lugar de uso final es grande (mayor a 1000 km), el hidrógeno se suele licuar y se emplea camiones cisterna criogénicos para su transporte. Así mismo, está establecida comercialmente la tecnología de transporte de hidrógeno por tubería,

aunque no hayan realizado redes de gasoducto para grandes distancias (19).

**2.2.14.2. Transporte de Hidrógeno líquido.** En el proceso de licuación de hidrogeno se consume una gran cantidad de energía primaria que, dependiendo de la técnica seguida, puede situarse entre el 30 y 40% del contenido energético del hidrogeno líquido. Los costos de la licuación son también muy altos, pero presentan una importante economía de escala, por tanto, a partir de un determinado volumen de producción, puede tomarse la opción de licuar. No obstante, para su transporte por camión o barco, a largas distancias, es necesario tener en consideración que las pérdidas por evaporización pueden alcanzar unas cantidades entre 0.2 y 0.4% del hidrógeno líquido por día. En el caso del transporte marítimo se requiere barcos rápidos para limitar el impacto de estas pérdidas, aunque el producto evaporado puede recuperarse y utilizarse para la propulsión del barco (19).

### **2.3. MARCO CONCEPTUAL.**

**2.3.1. Aerogeneradores.** Los aerogeneradores o turbinas de viento como también se les conocen, son máquinas que se encargan de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica (21).

**2.3.2. Austeníticos.** Es un tipo de acero inoxidable caracterizada a su buena resistencia a la corrosión, una buena conductividad y facilidad para ser soldada (22).

- 2.3.3. Carboxihemoglobina.** Es la hemoglobina resultante de la unión con el monóxido de carbono el cual al combinarse con la sangre ayuda a catalizar la proteína (23).
- 2.3.4. Combustóleo.** El combustóleo, aceite combustible residual de la destilación del petróleo crudo, es el combustible líquido más utilizado para la generación de electricidad (24).
- 2.3.5. Difusividad.** La Difusividad térmica es una propiedad específica de cada material para caracterizar conducción de calor en condiciones no estacionarias. Este valor describe cuán rápido un material reacciona a un cambio de temperatura (25).
- 2.3.6. Elementos Térreos.** El grupo de boro, elementos térreos, boroides o boroideos es una serie de elementos que están situados en el grupo 13 de la tabla periódica. Su nombre proviene de tierra, ya que el aluminio es el elemento más abundante en ella. La característica del grupo es que los elementos tienen tres electrones en su capa más externa, por lo que suele formar compuestos en los que presentan un estado de oxidación +3 (26).
- 2.3.7. Fibrosis Pulmonar.** Es una enfermedad cuya característica principal es la acumulación de síntomas como la tos, dificultad para respirar y sonidos pulmonares que descubre el médico al examinar al paciente (27).
- 2.3.8. Fotones.** El fotón es una partícula indivisible que se mueve, siempre, a la velocidad de la luz.
- 2.3.9. Ignición.** Es el efecto de iniciar una combustión.

**2.3.10. Oxihemoglobina.** Cuando la hemoglobina está unida al oxígeno, se denomina oxihemoglobina o hemoglobina oxigenada, dando el aspecto rojo intenso característico a la sangre arterial. Cuando pierde el oxígeno, se denomina hemoglobina reducida, y presenta el color rojo oscuro de la sangre venosa (28).

**2.3.11. Pirolisis.** Se llama pirolisis al proceso en el que una molécula se rompe por la acción del calor (29).

**2.3.12. Vector energético.** Se denomina vector energético a aquella sustancia o dispositivo que almacena energía, de tal manera que esta puede liberarse posteriormente de forma controlada. Se diferencia de las fuentes primarias de energía en que, a diferencia de estas, se trata de productos manufacturados, en los que previamente se ha invertido una cantidad de energía mayor para su elaboración (30).

## Capítulo III

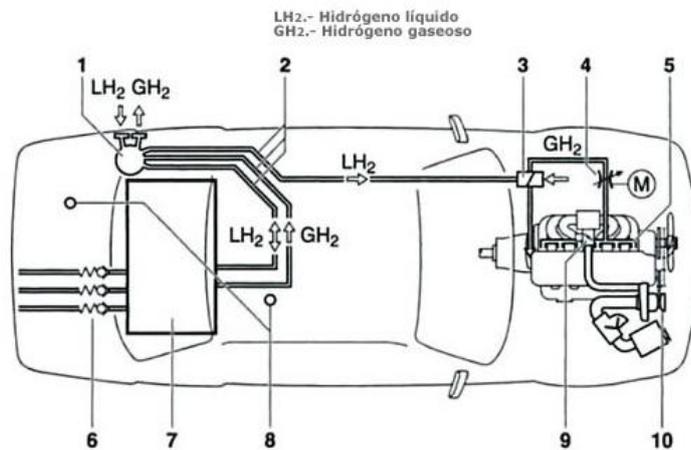
### 3. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA.

#### 3.1 Descripción del Proyecto.

Para la conversión de un motor de gasolina a hidrógeno interviene factores como potencia, rendimiento, contaminación, etc., factores que tienen que ser tomados en cuenta para una adecuada conversión, en este proyecto trataremos de demostrar a través de reacciones químicas en el proceso de combustión que el hidrogeno produce menos gases contaminantes a comparación de la gasolina y que la conversión de un motor Otto es factible ecológicamente.

**3.1.1. Esquema de conversión de un motor de combustión de gasolina a hidrogeno.** A continuación, se muestra un esquema de cómo sería la conversión de un motor de combustión de gasolina a hidrogeno y se mostrara un presupuesto calculado de cuánto costaría hacer este tipo de trabajo:

FIGURA 4. Esquema de inyección de hidrogeno.



FUENTE [www.aficionadosalamecanica.net](http://www.aficionadosalamecanica.net) (31)

- 1 Bloque de válvulas para repostaje de LH<sub>2</sub> y toma de GH<sub>2</sub>.
- 2 Tubería de conducción de hidrogeno, aisladas al vacío.
- 3 Evaporador de LH<sub>2</sub>.
- 4 Válvula dosificadora para mando de potencia con regulación electrónica.
- 5 válvula de inyección de hidrogeno.
- 6 válvula de rebose y de seguridad.
- 7 Depósito de hidrogeno liquido
- 8 Sensor de hidrogeno para control automático de fugas.
- 9 Válvula de mariposa para funcionamiento de gasolina con regulación electrónica.
- 10 Sobre alimentador centrífugo mecánico con variador de revoluciones.

**CUADRO 3.** Cuadro de presupuesto:

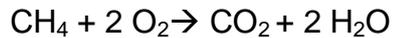
Materiales	Precio en (\$)
Bloque de válvulas para repostaje de LH <sub>2</sub> y toma de GH <sub>2</sub> .	45.28
Tubería de conducción de hidrogeno, aisladas al vacío.	20.00

Evaporador de LH <sub>2</sub> .	45.70
Válvula dosificadora para mando de potencia con regulación electrónica.	98.14
Válvula de inyección de hidrogeno.	120.00
Válvula de rebose y de seguridad.	100.00
Depósito de hidrogeno liquido	300.00
Sensor de hidrogeno para control automático de fugas.	80.20
Válvula de mariposa para funcionamiento de gasolina y hidrogeno con regulación electrónica.	150.00
Sobre alimentador centrifugo mecánico con variador de revoluciones.	130.00
Mano de obra	100.00
<b>Total</b>	<b>1189.32</b>

El presupuesto que se muestra en el cuadro 3, muestra los componentes que forman parte de un kit de conversión de gasolina a hidrogeno de un motor que funcione con carburador. El motor adaptado con este kit funcionara de manera dual hidrogeno/gasolina, pero no con los dos al mismo tiempo, de esta manera cuando el vehículo se quede sin hidrogeno, podremos hacerlo funcionar con gasolina y así no perjudicar al cliente. Los mantenimientos se deben realizar cada año, al igual que los vehículos duales de GNV/gasolina o GLP/gasolina.

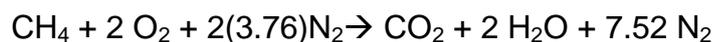
**3.1.2. El Proceso de Combustión convencional.** El proceso de combustión consiste en la oxidación de los constituyentes del combustible que pueden ser oxidados y, por lo tanto, se representa mediante una ecuación química. Durante un proceso de combustión, la masa de cada elemento permanecer igual. Así escribir ecuaciones químicas y resolver problemas relativos a las cantidades de los diversos

constituyentes indica básicamente la conservación de la masa de cada elemento. Cuando se quema un combustible hidrocarbonado, se oxida tanto el carbono como el hidrógeno. Consideremos, por ejemplo, la combustión del metano (32).



Aquí, los productos de la combustión son dióxido de carbono y agua. El agua puede estar en fase vapor, líquido o sólido, dependiendo de la temperatura y presión de los productos de la combustión. En la mayoría de los procesos de combustión, el oxígeno se suministra como aire y no como oxígeno puro.

En los cálculos sobre la combustión relacionados con el aire casi siempre se ignora el argón y se considera que el aire está compuesto por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno en volumen. Esta composición del aire lleva a la conclusión de que por cada mol de oxígeno intervienen  $(79.0/21.0) = 3.76$  moles de nitrógeno. Por lo tanto, cuando el oxígeno para la combustión del metano se suministra como aire se escribe como (32):



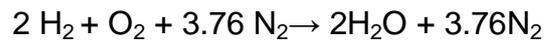
La cantidad mínima de aire que suministra suficiente oxígeno para la combustión completa de todo el carbono, el hidrógeno y cualquier otro elemento en el combustible y que se pueda oxidar, se llama aire teórico (32). Los motores de combustión interna de gasolina mantienen un equilibrio entre la entrega de potencia y generación de gases de combustión, operando con una mezcla estequiométrica de 14.7: 1, lo que significa que para quemar 1 kg de combustible se requiere 14.7 kg de aire, a esta proporción se le denomina factor lambda ( $\lambda$ ) este factor es la relación (6):

$$\text{Factor lambda } \lambda = \frac{\text{Masa de aire proporcionado}}{\text{Masa de aire necesario}}$$

El factor lambda puede tener los siguientes valores:

- $\lambda > 1.0$  se trata de una mezcla pobre en combustible.
- $\lambda = 1.0$  es una mezcla ideal.
- $\lambda < 1.0$  la mezcla es rica en combustible

**3.1.3. El Proceso de combustión con hidrógeno.** El hidrógeno solo puede estar en la naturaleza de forma estable en su forma molecular, es decir dos átomos por molécula ( $H_2$ ). La reacción química de combustión del hidrógeno es (19):



Como todas las reacciones químicas, la combustión del hidrógeno en forma de reacción en cadena con unas reacciones elementales que controlan la velocidad de la reacción completa. En este caso las reacciones elementales importantes son (19):

- $H_2 + O_2 \rightarrow HO_2 + H$
- $H + O_2 \rightarrow OH + O$
- $OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$
- $H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$

Donde M representa un tercer cuerpo (otra molécula inerte, pared etc.). Cada reacción elemental ocurre a una cierta velocidad que es el incremento de concentración de productos por unidad de tiempo. Una reacción completa de combustión de  $H_2$  debe proporcionar solo agua, el nitrógeno del aire y posiblemente oxígeno sobrante. Se

denomina relación estequiométrica a la relación de masa o de volumen, según sea el caso, de hidrógeno y aire necesario para que se cumpla la reacción anterior sin que sobre hidrógeno ni aire. Esta proporción es (con bastante aproximación) la siguiente (19):

2 moles de H<sub>2</sub> reaccionan con una mol de O<sub>2</sub> y 3.76 moles de N<sub>2</sub>.

Dosado estequiométrico (en masa) =  $(4/137.3) = 0.0291$

### 3.2. Resultados.

**CUADRO 4.** comparativa del hidrógeno con respecto de la gasolina.

Propiedad	Unidad	Hidrógeno	Gasolina
Densidad	Kg/cm <sup>3</sup>	0.07	0.73-0.74
Aire/comb.	m/m	34.3	14.7
P.C.I.	KJ/kg	119 970	43 500
P.C. Mezcla Estequiométrica.	KJ/m <sup>3</sup>	2 927	3 458
Coef. Difusión en aire	cm <sup>2</sup> /s	0.61	0.05
Límites de inflamabilidad	% vol.	4-74.5	1-7.6
Energía mínima de encendido	M J	0.02	0.24
Temperatura de combustión	°C	2 318	2 470
Emisión de CO <sub>2</sub>	%	-	24.56
Emisión de N <sub>2</sub>	%	74.52	19.22
Emisión de H <sub>2</sub> O	%	25.48	56.22

Fuente: combustibles alternativos en automoción, pág. 130, (19).

Como se puede analizar en la tabla 3.2.1 el hidrógeno ya no produce CO<sub>2</sub> a diferencia de la gasolina, comprobando así que de

que el hidrógeno usado como combustible en los motores de combustión es menos contaminante.

También la temperatura de combustión del hidrogeno es de 2318 °C a comparación de la gasolina que es de 2470 °C según la tabla 3.2.1, por lo que no existiría problemas para soportar las temperas de combustión.

#### **4. Conclusión.**

Según los cálculos estequiométrico realizados, se demuestra que la gasolina es más contaminante que el hidrogeno, demostrando así que la conversión de un motor de combustión de gasolina a hidrógeno es factible ecológicamente.

Existe una pérdida de potencia debido a que el volumen ocupado por el hidrógeno reduce la cantidad de aire admisible en la cámara de combustión.

## **5. Recomendación.**

Se recomienda el uso del hidrógeno como combustible por ser menos contaminante que la gasolina.

Se recomienda al momento de realizar la conversión de gasolina a hidrógeno aumentar el volumen del cilindro para reducir las pérdidas de potencia.

## Bibliografía

1. Meganeboy D. Aficionados a la Mecanica. [Online].; 2014 [cited 2014 Noviembre 13. Available from: <http://www.aficionadosalamecanica.net/emision-gases-escape.htm>.
2. Tipos de gases producidos en la combustion y sus consecuencias. [Online]. [cited 2014 noviembre 13. Available from: [http://www.as-sl.com/pdf/tipos\\_gases.pdf](http://www.as-sl.com/pdf/tipos_gases.pdf).
3. Miranda BMAHyAL. El Hidrogeno Fundamento de un Futuro Equilibrado. segunda ed. España: Diaz de Santos; 2007.
4. NGK Spark Plug Europe GNBH. NGK. [Online].; 2014 [cited 2014 Noviembre 14. Available from: <http://www.ngk.de/es/tecnologia-en-detalle/sondas-lambda/aspectos-basicos-de-los-gases-de-escape/gases-de-escape-y-gases-contaminantes/>.
5. SoyRenovable.es. ciencia y religion. [Online].; 2010 [cited 2014 noviembre 26. Available from: [http://cienciayreligion.org/ciencia/ciencia\\_05.html](http://cienciayreligion.org/ciencia/ciencia_05.html).
6. Garcia JS. Hidrógeno y Energias Renovables Solucion para un Mañana Sustentable. Primera ed. Garcia JS, editor. Mexico: Trillas; 2014.
7. Cristian F. Inyeccion de Hidrógeno como Potencial Mejora de lo Motores Actuales. Proyecto Final de Carrera. Barcelona: Univercidad Politecnica de Cataluña, Ingeniería Técnica Naval; 2010-2011.
8. Cristian F. Inyección de Hidógeno Como Potencial Mejora de los Motores Actuales. Proyecto de Final de Carrera. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña, Ingenieria Técnica Naval; 210-2011.
9. Cristian F. Inyeccion de Hidrógeno como Potencial Mejora de los Motores Actuales. Proyecto de Final de Carrera. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, Ingenieria Técnica Naval; 2010-2011.
10. Cristian F. Inyeccion de Hidrógeno como Potencial Mejora de los Motores Actuales. Proyecto de Final de Carrera. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, Ingenieria Técnica Naval; 2010-2011.
11. Yunus C, Michael B. Termodinámica. sexta ed. Pablo R, editor. Mexico: Mc Graw Hill; 2009.

12. Altereco21. [Online].; 2014 [cited 2016 julio 20. Available from: <http://altereco21.org/productos-y-servicios/ahorradores-de-combustible/propiedades-del-hidrogeno-y-del-hho/>.
13. altereco. ALTERECO21. [Online].; 2015 [cited 2016 07 20. Available from: <http://altereco21.org/productos-y-servicios/ahorradores-de-combustible/propiedades-del-hidrogeno-y-del-hho/>.
14. SAE Internatinal. [Online].; 2009 [cited 2016 julio 07. Available from: <http://papers.sae.org/2009-01-2814/>.
15. Kenneth W, Cecil W. Contaminacion del Aire Origen y Control. Quinta Reimpresion ed. Editores N, editor. Mexico: Limusa ; 1998.
16. Wikipedia. Wikipedia. [Online].; 2015 [cited 2015 Enero 20. Available from: [http://es.wikipedia.org/wiki/Mon%C3%B3xido\\_de\\_carbono](http://es.wikipedia.org/wiki/Mon%C3%B3xido_de_carbono).
17. Carmen O, Antonio P, Nieves G, Francisco R, Jose. A. Contaminacion Ambiental una Visión desde la Química. Primera ed. Thomsom , editor. Madrid : Paraninfo; 2003.
18. Jordi L. El Hidrogeno y Nuestro Fututo Energetico. In PubliCEP , editor. El Hidrogeno y Nuestro Fututo Energetico. alemany: Universidad Politecnica de Catalunya; 2010. p. 83.
19. Ricardo A, Manuel L, Alfredo M, Javier A, Carlos D, Roberto C, et al. Combustibles Alternativos en Automicion. Primera ed. España: Cie Dossat; 2008.
20. madrimasd. [Online].; 2013 [cited 2016 julio 15. Available from: <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2013/05/23/132064>.
21. Aerogeneradores. [Online].; 2007 [cited 2015 Enero 5. Available from: <http://www.aerogeneradores.com/>.
22. Aperam. [Online]. [cited 2015 Enero 10. Available from: <http://www.aperam.com/precision/es/calidades/austenitico.html>.
23. Wikipedia. [Online].; 2014 [cited 2015 Enero 10. Available from: <http://es.wikipedia.org/wiki/Carboxihemoglobina>.

24. Emisiones Atmosféricas de la Centrales Electricas en America del Norte. [Online].; 2011 [cited 2015 Enero 12. Available from: <http://www2.cec.org/site/PPE/es/combustibles-f%C3%B3siles/combust%C3%B3leo>.
25. Netzsch. [Online].; 2014 [cited 2015 Enero 12. Available from: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/de/literatur-digitale-medien/literatur/poster.html>.
26. Wikipedia la enciclopedia libre. [Online].; 2014 [cited 2015 Enero 13. Available from: [http://es.wikipedia.org/wiki/Grupo\\_del\\_boro](http://es.wikipedia.org/wiki/Grupo_del_boro).
27. DMedicina.com. [Online].; 2014 [cited 2015 Enero 14. Available from: <http://www.dmedicina.com/enfermedades/respiratorias/fibrosis-pulmonar>.
28. Enciclopedia. [Online].; 2012 [cited 2015 Enero 20. Available from: <http://enciclopedia.us.es/index.php/Oxihemoglobina>.
29. Ocwus. [Online].; 2012 [cited 2015 Enero 20. Available from: [http://ocwus.us.es/quimica-organica/quimica-organica-i/temas/2\\_alcanos/leccion8/page\\_13.htm](http://ocwus.us.es/quimica-organica/quimica-organica-i/temas/2_alcanos/leccion8/page_13.htm).
30. Enciclopedia Libre. [Online].; 2014 [cited 2015 Enero 20. Available from: [http://es.wikipedia.org/wiki/Aire\\_comprimido](http://es.wikipedia.org/wiki/Aire_comprimido).
31. MECANICA AAL. WWW.AFICIONADOSALAMECANICA.NET. [Online].; 2014 [cited 2016 07 15. Available from: <http://www.aficionadosalamecanica.net/motores-hidrogeno.htm>.
32. Gordon V. Fundamentos de Termodinámica. segunda ed. Noriega G, editor. México: Limusa; 2002.