



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE
ALTERNATIVO EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**

Jorge Eduardo Tampán Marroquín

Asesorado por el M.A. Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres

Guatemala, octubre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE
ALTERNATIVO EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JORGE EDUARDO TAMPÁN MARROQUÍN
ASESORADO POR EL M.A. ING. BYRON GIOVANNI PALACIOS COLINDRES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 25 de septiembre de 2014.

Jorge Eduardo Tampán Marroquín

Guatemala, 27 de mayo de 2015

Ingeniero Julio Cesar Campos
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

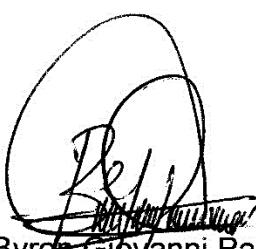
Ingeniero Campos:

Atentamente me dirijo a usted con el propósito de presentarle el trabajo de graduación “CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA”, elaborado por el estudiante Jorge Eduardo Tampán Marroquín.

En mi calidad de asesor, considero que el trabajo presentado por el estudiante Jorge Tampán, llena los objetivos planteados en el trabajo y me dirijo a usted para que se sirva dar el visto bueno para que el presente trabajo sea presentado ante las máximas autoridades de la Facultad, a fin de que emitan el dictamen correspondiente y si así lo consideran extiendan el título al estudiante mencionado.

Agradeciendo su atención.

Atentamente,



Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
Asesor de trabajo de graduación
Colegiado 5,641

Ing. Byron G. Palacios C.
Colegiado No. 5641



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.203.2015

El Coordinador del Área Térmica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**. Del estudiante **Jorge Eduardo Tampán Marroquín**, recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Roberto Guzmán Ortíz
Coordinador del Área Térmica
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, junio de 2015.



Ref.E.I.M.307.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Térmica del trabajo de graduación titulado: **CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA** del Estudiante **Jorge Eduardo Tampán Marroquín**, Carné No. 2004-12984 y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica


FACULTAD DE INGENIERÍA USAC
DIRECCIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Guatemala, octubre de 2015
/aej



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 527.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Eduardo Tampán Marroquín**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2015

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios altísimo

Por concederme el privilegio de ser ingeniero.
Por cuidar de mí y cuidarme como un padre
cuida a su hijo.

Mi madre

Tú eres un ángel que Dios puso en mi camino
para guiarme, cuidarme y protegerme. Te
agradezco todo el amor y los cuidados que has
tenido, por apoyarme todo el tiempo.

Mi hermana

Evelyn Tampán, por estar siempre en la
disposición de ayudar y por creer en mí.

Mis abuelos

Por formar hombres y mujeres de bien, por no
permitir que nos desviáramos del buen camino
y el amor que nos dieron.

Mi familia

A mis tíos y primos por estar a mi lado,
apoyarme a seguir adelante y no desmayar, y
estar en este momento tan especial para mí.

Facultad de Ingeniería

Por creer en mí, y permitirme estudiar en sus
aulas y forjar mi futuro.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios altísimo

Por darme la vida, no tengo palabras para agradecerte lo que has hecho y lo que harás por mí.

Mi madre

Por apoyarme incondicionalmente, al estar a mi lado apoyándome y guiándome; no hubiera sido posible salir adelante sin ti.

Mis abuelos y abuelas

Aurelio Marroquín, Catalina de Marroquín y Joaquina Figueroa. Por ser ejemplo de hombres y mujeres luchadores que no se rinden ante las adversidades.

Mis tíos y tías

Ana, Aura, Miriam, Julio, Marta, Rosa, Brenda, Oscar Marroquín, Eduardo y Anabela Figueroa, por ser ejemplo de hombres y mujer de bien.

Ing. Carlos Chicol

Por su apoyo y sus consejos, por brindarme su amistad y ser un ejemplo para todos los que le conocemos.

Ing. Byron Palacios

Por apoyarme en el desarrollo de este trabajo de graduación, por brindarme su amistad y por la paciencia que me tuvo para finalizar este trabajo.

Ing. Roberto Guzmán

Por enseñarme que una amistad es más valiosa que cualquier tesoro del mundo, gracias por apoyarme en la realización de este trabajo de graduación.

Mis amigos

En especial a: Carlos Chicol, Orlando Medina, Paulo Vargas, David Barrientos, Juan Carlos Gudiel, Wilson Wellmman, por ayudarme y apoyarme durante el tiempo que estudiamos.

Jorge Figueroa

Gracias por apoyarme y ayudarme en la realización de este trabajo.

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por brindarme la oportunidad de estudiar dentro de sus aulas y brindarnos la oportunidad de ser profesionales.

Compañeros de trabajo

A todas las personas que durante años me permitieron perseguir mi sueño de ser ingeniero convirtiéndose en cómplices de este triunfo, los llevaré eternamente en mi corazón .

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. HISTORIA Y EVOLUCIÓN DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA	1
1.1. Los inicios del motor de combustión	1
1.2. Principales inventores del motor de combustión interna	3
1.2.1. Motor Stirling.....	5
1.2.2. Motor de Lenoir.....	6
1.2.3. Motor de Brayton	8
1.2.4. Motor Otto.....	9
1.2.4.1. Motor de dos tiempos	10
1.2.4.2 Motor de cuatro tiempos.....	11
1.2.5. Motor diésel	13
1.2.6. Motor Wankel.....	15
1.2.7. Clasificación de los motores por aplicación.....	16
1.3. Partes principales de un motor de combustión de 4 tiempos ...	20
1.3.1. Carburador.....	20
1.3.2. Inyector	21
1.3.3. Pistón.....	22
1.3.4. Culata	24

1.3.5.	Bielas	26
1.3.6.	Válvulas.....	27
1.3.7.	Eje de leva.....	28
1.3.8.	Cigüenal	30
1.3.9.	Catalizador	31
1.3.9.1.	Principales materiales para la construcción de catalizadores	32
1.3.9.2.	Tipo de catalizadores.....	33
1.3.9.3.	Ayuda ambiental negativa de los catalizadores	34
1.3.10.	Volante de inercia.....	35
1.3.11.	Escape	37
1.3.12.	Bujías	39
1.3.13.	Turbocompresor	39
1.4.	Desplazamiento	41
1.5.	Relación de compresión motor ciclo Otto	42
1.6.	Relación de compresión motor ciclo Diésel	43
1.7	Relación de combustión	43
2.	IMPACTO AMBIENTAL POR LA QUEMA DE COMBUSTIBLES FÓSILES	45
2.1	Combustibles fósiles	45
2.1.1.	Carbón	47
2.1.2.	Petróleo	48
2.1.2.1.	Refinado de petróleo	49
2.1.2.2.	Reservas de petróleo pico Hubbert.....	50
2.1.3.	Gas natural.....	54
2.1.4.	Efectos ambientales de los combustibles fósiles	55
2.1.4.1.	Lluvia ácida.....	56

2.1.4.2.	Calentamiento global.....	58
2.2.	Gases de efecto invernadero por la quema de combustibles fósiles	59
2.2.1.	Monóxido de carbono CO	61
2.2.2.	Dióxido de carbono CO ₂	62
2.2.3.	Óxido nitrógeno NOx.....	62
2.2.4.	Metano.....	63
2.3.	Propiedades termodinámicas de los gases.....	64
2.4.	Mezcla de gases ideales.....	66
2.5.	Composición del aire y los combustibles	67
2.5.1.	Aire	67
2.5.2.	Combustibles	68
2.6.	Combustión estequiométrica	69
2.6.1.	Mezcla ideal.....	71
2.6.2.	Mezcla pobre	71
2.6.3.	Mezcla rica.....	72
2.7.	Energía calorífica de los combustibles.....	72
2.8.	Enfriamiento del motor.....	73
2.9.	Importancia de la transferencia de calor	76
2.10.	Cálculos de transferencia de calor en el motor	77
2.11.	Cálculos de enfriamiento del motor.....	78
2.12.	Pérdidas mecánicas y lubricación del motor	80
2.13.	Pérdidas por fricción	83
2.14.	Sistemas de lubricación	83
2.14.1.	Propiedades generales de los lubricantes.....	85
2.14.1.1.	Índice de viscosidad	87
2.14.1.2.	Aditivos	89

3.	PRODUCCIÓN Y MANEJO DEL HIDRÓGENO.....	91
3.1.	Introducción	91
3.2.	Propiedades generales del hidrógeno	91
3.2.1.	Propiedades físicas	93
3.2.1.1.	Densidad	94
3.2.1.2.	Volumen específico	95
3.2.1.3.	Gravedad específica.....	95
3.2.2.	Propiedades químicas	95
3.2.2.1.	Compuestos	96
3.2.2.2.	Reactividad.....	97
3.2.2.3.	Reacciones por la combustión	98
3.2.3.	Propiedades térmicas	99
3.2.3.1.	Poder calorífico.....	100
3.2.3.1.1.	Poder calorífico superior.....	100
3.2.3.1.2.	Poder calorífico inferior.....	101
3.2.3.2.	Densidad de energía	102
3.2.3.3.	Punto de encendido	103
3.2.3.4.	Rango de inflamabilidad	104
3.2.3.5.	Temperatura de autoencendido	105
3.2.3.6.	Energía de ignición	106
3.2.3.7.	Velocidad de quemado	106
3.3.	Hidrógeno líquido y su relación de expansión	107
3.4.	Corrosión de materiales por hidrógeno	109
3.5.	Efectos fisiológicos.....	110
3.6.	Características de las mezclas de gases con hidrógeno	112
3.7.	Producción de hidrógeno por medio de algas	112
3.8.	Producción mediante hidrocarburos	113

3.8.1.	Reformado mediante vapor.....	113
3.8.2.	Gasificación del carbón.....	115
3.8.3.	Pirolisis	116
3.8.4.	Proceso parcial de oxidación de hidrocarburos	116
3.8.5.	Proceso de reformado autotérmico	117
3.8.6.	Proceso Kvaerner y reformado mediante plasma..	117
3.9.	Producción a partir del agua	118
3.9.1.	Electrólisis.....	118
3.9.2.	Termólisis	120
3.10.	Producción a partir de procesos biológicos.....	121
3.10.1.	Producción fotobiológica	121
3.10.2.	Producción mediante hidrogenasas	121
3.10.3.	Producción por nitrogenasas.....	122
3.10.4.	Generación fermentativa.....	123
3.10.5.	Sistemas mixtos.....	124
3.11.	Almacenamiento del hidrógeno.....	125
3.11.1.	Almacenamiento en estado gaseoso	126
3.11.2.	Almacenamiento en estado líquido	127
3.11.3.	Almacenamiento en estado sólido	127
3.12.	Transporte y distribución para el hidrógeno	128
3.12.1.	Transporte en estado líquido.....	129
3.12.2.	Transporte en estado gaseoso.....	130
3.13.	Purificación catalítica	131
3.14.	Separación	132
3.14.1.	Separación mediante adsorción.....	133
3.14.2.	Separación mediante membranas.....	133
3.14.3.	Separación mediante criogénica	134
3.15.	Medidas de seguridad	135
3.15.1.	Fugas de hidrógeno	137

3.15.2.	Evitar atmósferas explosivas	137
3.15.3.	Evitar ignición por fuentes externas	140
3.15.4.	Reaccionar ante fugas de hidrógeno	141
3.5.15.	Almacenamiento seguro de los tanques	142
4.	EL AGUA COMO UNA FUENTE DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO.....	143
4.1.	Introducción	143
4.2.	El uso de agua sin tratamiento	143
4.2.1.	Dureza.....	144
4.2.2.	Alcalinidad.....	145
4.2.3.	Acidez	145
4.2.4.	Minerales.....	146
4.2.5.	Conductividad.....	147
4.2.6.	Sólidos en suspensión.....	148
4.2.7.	Sólidos disueltos.....	149
4.3.	El uso de agua destilada	150
4.4.	El uso de agua desmineralizada	150
4.4.1.	Cationes	151
4.4.2.	Aniones	152
4.4.3.	Uso de hidróxido de sodio como elemento electrolítico	152
4.4.4.	Uso de hidróxido de potasio como elemento electrolítico	153
4.4.5.	El uso de carbonato de potasio como elemento electrolítico	155
4.5.	Propuesta de diseño de la celda de generación de hidrógeno	155

4.6.	Propuesta de materiales a utilizar para la construcción de la celda.....	156
4.7.	Cálculo de consumo de energía eléctrica para la producción.....	158
4.8.	Análisis del comportamiento de la celda en funcionamiento ..	159
5.	MÉTODOS DE INTRODUCIR EL HIDRÓGENO AL MOTOR DE COMBUSTIÓN.....	161
5.1.	Inyección del hidrógeno.....	161
5.2.	Elementos de control de inyección	162
5.3.	Introducción por sistema de carburación	163
5.4.	Introducción por sistema de inyección indirecta	163
5.5.	Inyección directa.....	165
6.	EMISIONES EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN UTILIZANDO HIDRÓGENO	167
6.1.	Emisión de humos e hidrocarburos.....	167
6.2.	Emisiones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO ₂)	170
6.3.	Emisiones de óxido nitroso (NOx).....	172
6.4.	Reducción de las emisiones de óxido nitroso (NOx)	173
6.4.1.	Mediante ajustes a la <i>engine control unit</i> (ECU) ...	174
6.4.2.	Mediante enriquecimiento del hidrógeno con éter etílico	174
6.4.3.	Mediante la recirculación de los gases de escape	177
6.4.4.	Mediante reducción catalítica.....	178

7.	HIDRÓGENO UTILIZANDO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	181
7.1.	Relación de aire-combustible	181
7.2.	Problemas de preencendido.....	183
7.3.	Sensores de fuga	184
7.4.	Inyección central	184
7.5.	Sistema de encendido.....	185
7.6.	Ventilación del cárter del cigüeñal	186
7.7.	Eficiencia térmica	187
7.8.	Potencia de salida	188
	CONCLUSIONES	195
	RECOMENDACIONES	197
	BIBLIOGRAFÍA	199

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Eolípila	1
2.	Esquema del motor Stirling	6
3.	Diagrama presión-volumen del motor de lenoir	7
4.	Esquema del motor Brayton y representación P-V	8
5.	Principio de operación del motor a gas de Otto	9
6.	Motor de dos tiempos de Clerk.....	11
7.	Tiempos del ciclo de combustión	13
8.	Motor diésel moderno.....	14
9.	Motor Wankel.....	16
10.	Carburador.....	20
11.	Inyector común de gasolina	21
12.	Cabeza de pistón	24
13.	Culata	25
14.	Biela tipo H.....	26
15.	Válvulas para motor diésel	28
16.	Sistema de árbol de levas DOHC.....	29
17.	Cigüeñal para motor de 4 cilindros	31
18.	Volante	36
19.	Sistemas de escape con catalizador y sensor de oxígeno	38
20.	Bujía	39
21.	Turbocompresor.....	41
22.	Formación de combustibles fósiles.....	46
23.	Curva de Hubbert.....	51

24.	Gráfica de producción vs descubrimientos actuales	54
25.	Lluvia ácida.....	57
26.	Efecto invernadero de la atmósfera	61
27.	Tranferencia de calor en el motor	78
28.	Comparación entre las distintas formas de fricción del motor	82
29.	Curva SAE para la viscosidad en función de la temperatura.....	88
30.	Estación de llenado de hidrógeno líquido hidrogenera.....	125
31.	Electrolizador de celda seca	157
32.	Inyección indirecta en manifold de admisión	165
33.	Inyección directa.....	166
34.	Variaciones de humos con respecto a la carga del motor usando diferentes flujos de hidrógeno	168
35.	Variación de hidrocarburos con respecto a la carga del motor.....	169
36.	Variación de monóxido de carbono respecto a la carga.....	171
37.	Variación de dióxido de carbono respecto a la carga.....	171
38.	Variación de óxidos de nitrógeno con la carga.....	176
39.	Variación de la eficiencia térmica con la carga	179
40.	Variación de óxidos de nitrógeno respecto a la carga del motor	180

TABLAS

I.	Principales inventores de los motores de combustión interna	3
II.	Clasificación de los motores	17
III.	Clasificación de los motores de combustión por aplicación.....	18
IV.	Fracciones de petróleo	50
V.	Principales constituyentes del aire seco	67
VI.	Entalpia de formación y pesos moleculares	68
VII.	Poderes caloríficos de algunos combustibles	73
VIII.	Pérdidas en el motor en función del poder calorífico inferior.....	79

IX.	Propiedades generales del hidrógeno	92
X.	Densidades del hidrógeno frente a otros combustibles	94
XI.	Valores caloríficos de algunos combustibles	99
XII.	Tabla comparativa de calores específicos en combustibles	101
XIII.	Densidad de energía de distintos combustibles	102
XIV.	Punto de encendido de algunos combustibles	104
XV.	Temperatura de autoencendido de combustibles comparables.....	106
XVI.	Síntomas dependiendo de la concentración de hidrógeno	111
XVII.	Índices de dureza del agua	144
XVIII.	Diferentes electrolitos y sus características.....	154
XIX.	Propiedades del hidrógeno en comparación con el diésel y el éter etílico	175
XX.	Comparativo del motor Mazda MX-5	191
XXI.	Tabla comparativa de motor del hidrógeno vs gasolina en modelos BMW idénticos	192

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H_2CO_3	Ácido carbónico
HNO_3	Ácido nítrico
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
API	<i>American Petroleum Institute</i>
CV	Caballo de vapor
CaCO_3	Carbonato de calcio
CNC	Control numérico computarizado
SO_2	Dióxido de azufre
CO_2	Dióxido de carbono
DOHC	<i>Dual Overhead Camshaft</i>
$^{\circ}\text{C}$	Grado Celsius
$^{\circ}\text{F}$	Grado Fahrenheit

KOH	Hidróxido de potasio
NaOH	Hidróxido de sodio
pH	Indicador de acidez o alcalinidad
kg	Kilogramo
kJ	Kilojoule
kW	Kilowatt
CH₄	Metano
NO	Monóxido de nitrógeno
PWM	<i>Pulse with modulation</i>
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
rpm	Revoluciones por minuto
S/m	Siemens por metro
SOHC	<i>Single overhead camshaft</i>
Vs	<i>Versus</i>

GLOSARIO

Aparato	Cualquier dispositivo que utiliza energía para producir luz, calor, potencia mecánica, refrigeración o aire acondicionado.
Anión	Es un ion con carga eléctrica negativa, es decir, que ha ganado electrones.
Bituminoso	Son sustancias de color negro, sólidas o viscosas, dúctiles, que se ablandan por el calor y comprenden aquellos cuyo origen son los crudos petrolíferos como también los obtenidos por la destilación destructiva de sustancias de origen carbonoso.
Catalizador	Son las sustancias que actúan sobre la velocidad de reacción sin cambiarla químicamente.
Catión	Es un ion, átomo o molécula con carga eléctrica positiva, es decir, que ha perdido electrones.
Celda de combustible	Es un dispositivo de conversión de energía que convierte la energía química del combustible directamente en electricidad sin ningún proceso térmico o mecánico intermedio.

Cogeneración	Es la producción simultánea en el lugar de energía eléctrica y calor producida por la misma fuente de potencia.
Combustión	Es la oxidación rápida de combustible acompañada por una producción de calor y luz.
Deflagración	Es una combustión explosiva, gradual y menos violenta que la detonación.
Densímetro	Es un instrumento de medición que sirve para determinar la densidad relativa de los líquidos sin necesidad de haber calculado antes su masa y volumen.
Desmodrómicas	Es un sistema de distribución del tren de válvulas utilizado en motores de combustión interna de cuatro tiempos caracterizado por el accionamiento de las válvulas, tanto en su recorrido de apertura como de cierre, mediante dos perfiles de leva, obviando el uso del resorte.
EGR	Válvula controlada por vacío o por la computadora de abordo para introducir gases quemados al múltiple de admisión.
Electrón	Se abrevia e-, es una partícula que posee una carga unitaria relativa que es negativa y una masa de $9,109 \times 10^{-28}$ g.

Electrólisis	Es el proceso de extraer el hidrógeno del agua. La principal característica de la electrólisis es que puede ser totalmente no contaminante y utiliza recursos renovables.
Electrolito	Es un compuesto fundido o su disolución acuosa que es conductor de una corriente eléctrica. Es una sustancia que conduce iones.
Electrolizador	Es una serie de celdas cada una con un electrodo positivo y negativo.
Energía de ignición	Es la cantidad de energía externa que debe ser aplicada para encender una mezcla de combustible.
Entalpía	Es una magnitud termodinámica, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia en su entorno.
Estequiometría	Estudio y medida de las proporciones de peso o de volumen en que reaccionan y se combinan los elementos químicos para formar un compuesto.
Forjado	Es un proceso de conformado por deformación plástica que puede realizarse en caliente o frío y en el que la deformación del material se produce por la aplicación de fuerzas de compresión.

Fósil	Son los restos o señales de la actividad de organismos pretéritos.
Hidrocarburo	Compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. La estructura molecular consiste en un armazón de átomos de carbono a los que se unen los átomos de hidrógeno.
Hollín	Son partículas sólidas de tamaño muy pequeño, en su mayoría compuestas de carbono impuro, pulverizado resultantes de la combustión incompleta de un material.
Huelgo	Espacio vacío que queda entre dos piezas que han de encajar una en la otra.
Hulla	Es una roca sedimentaria orgánica, un tipo de carbón mineral que contiene entre un 45 y un 85 % de carbono.
Incoloro	Materia o sustancia que no tiene color.
Inodoro	Materia o sustancia que no tiene olor.
Ion	Es un átomo o un grupo de átomos que han adquirido una carga eléctrica a través de la pérdida o la ganancia de uno o más electrones.

Isótopos	Son átomos del mismo elemento que poseen pesos distintos. Son átomos que tienen diferentes masas atómicas o números de masa, pero el mismo número atómico.
Lignito	Carbón mineral que se forma por compresión de la turba, convirtiéndose en una sustancia desmenuzable en la que aún se pueden reconocer algunas estructuras vegetales.
Mol	Es la unidad que expresa números de átomos, iones o moléculas. Es la cantidad de sustancia que contiene el mismo número de partículas elementales que contienen 12 g de carbono 12.
Neutrón	Se abrevia n, es una partícula neutra que no tiene carga y cuya masa es de $1,6748 \times 10^{-24}$ g.
Oxidación	Es una reacción es la que una substancia se combina con el oxígeno.
Protón	Se abrevia p. es una partícula que tiene carga unitaria relativa que es positiva y un masa de $1,6726 \times 10^{-24}$ g.
Punto de encendido	El punto de encendido está definido como la temperatura a la cual el combustible produce vapor suficiente para formar una mezcla con el aire, incendiable, en su superficie.

Reformación	Es el proceso de extraer el hidrógeno de los combustibles fósiles. Es el proceso químico que hace reaccionar el contenido de hidrógeno de los combustibles en presencia del vapor, oxígeno o ambos en un flujo de gas rico en hidrógeno.
Spin	Cada protón en un par molecular de hidrógeno tiene un campo asociado al que puede ser visualizado y descrito matemáticamente como un giro o spin.
Solubilidad	Es una medida de la capacidad de disolverse en una determinada sustancia (sólido) en un determinado medio (solvente).
Turba	Material orgánico, de color pardo oscuro y rico en carbono. Está formado por una masa esponjosa y ligera en la que aún se aprecian los componentes vegetales que la originaron.
Venturi	Consiste en que un fluido en movimiento, dentro de un conducto cerrado, disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor.

RESUMEN

Los motores de combustión interna son máquinas térmicas capaces de transformar la energía química de combustible en energía mecánica mediante la combustión. El futuro de los motores de combustión es incierto, ya que se prevé, según la curva de Hubbert, que para el año 2050 las reservas de petróleo de todo el planeta se agoten por completo con base en el consumo actual.

Debido a que el hidrógeno se puede utilizar como un combustible para los motores de combustión, con emisiones de gases de efecto invernadero casi nulas, este podría formar parte de la solución de la crisis energética y el cambio climático. El hidrógeno es realmente fácil y económico de obtener en comparación al petróleo. Este no requiere de pozos de extracción tampoco de una destilería, aunque si requiera de plantas de proceso y refinado.

El hidrógeno, como se sabe, es el elemento químico más abundante del universo aunque en la tierra no se puede encontrar en su forma pura, sin embargo si se puede extraer del agua mediante electrolisis y termólisis, de hidrocarburos mediante el proceso *Kvaerner*. Uno de los procesos más utilizados para equipar vehículos con pilas de combustión de hidrógeno es el proceso parcial de oxidación de hidrocarburos.

Existen otros tipos de producción de hidrógeno como el de los sistemas biológicos. Se trata de obtener hidrógeno mediante la descomposición de materia orgánica. Entre los proceso los que más se destacan son la generación fermentativa y la generación fotobiológica. La producción de hidrógeno por

sistemas biológicos es un proceso que aún está en fase de desarrollo; pero su aplicación en el futuro es muy prometedora.

El hidrógeno se quema con una velocidad 2,5 veces mayor a la de la gasolina convencional, con tan solo 0,02 mJ de energía de ignición y una temperatura de autoencendido de 585 °C lo convierten en una alternativa de combustible para los motores de combustión interna.

Los motores de combustión interna actuales que funcionan con combustibles derivados del petróleo como la gasolina de 88 y 92 octanos, o el diésel pueden ser utilizados con hidrógeno como combustible secundario mediante un sistema *bifuel*. Este sistema permite la utilización de ambos combustibles a la vez sin la necesidad de mezclarse antes de ingresar a la cámara de combustión. Se ha comprobado una significativa reducción del combustible principal al utilizar este sistema sin dañar el motor.

Al combustionar hidrógeno en los motores de combustión interna se logran obtener resultados muy satisfactorios en cuanto al tema de la contaminación ambiental. Este reduce la producción de gases de efecto invernadero al combustionarse produciendo como producto secundario agua y vapor. Las emisiones de dióxido de carbono se reducen en más del 90 %.

OBJETIVOS

General

Dar a conocer detalladamente la forma correcta de implementar el uso de hidrógeno como combustible alternativo en los motores de combustión interna.

Específicos

1. Determinar una manera eficiente de producir hidrógeno y a la vez utilizarlo como combustible para los motores de combustión interna.
2. Conocer los cambios necesarios en los motores de combustión interna para usar hidrógeno como combustible.
3. Establecer los elementos del motor de combustión interna que ameritan un mantenimiento continuo al utilizar hidrógeno como combustible.
4. Dar conocer la importancia de manejar y manipular hidrógeno de una manera segura y responsable.
5. Comparar las diferencias entre los diversos tipos de motores de combustión interna a los cuales se les puede implementar el hidrógeno como combustible alternativo.

INTRODUCCIÓN

Las altas emisiones de dióxido de carbono, debido a la quema de hidrocarburos que son extraídos de los productos derivados del petróleo han causado alarmas mundiales. Esto por los altos niveles de contaminación que están provocando un casi inevitable cambio climático.

Actualmente muchas tecnologías están siendo desarrolladas para reducir la dependencia de los productos derivados del petróleo. Aprovechando muchos de los recursos renovables que se encuentran en la naturaleza como la producción de un combustible alternativo: el hidrógeno ofrece la oportunidad de reducir la contaminación ambiental y la producción en masa a un bajo costo económico.

El hidrógeno, debido a sus propiedades mecánicas, físicas, químicas y termodinámicas, es muy similar a muchos otros combustibles utilizados hoy en día. Este es muy fácil de producirse por medio de electrolisis, tanto que mucha gente prefiere producirlo caseramente a comprarlo ya procesado. El alto poder calorífico, la alta explosividad, el bajo costo de producción y la alta disponibilidad en el medio ambiente permiten usarlo como un combustible limpio y auto sostenible.

El agua es un recurso no renovable pero se encuentra en gran parte de la superficie terrestre cubriendo casi el 75 % del planeta por medio de océanos, lagos, ríos, glaciares y otros. Por medio del agua se genera una cantidad considerable de hidrógeno, al separar sus dos átomos del de oxígeno. Cabe

mencionar que la manipulación de una forma negligente del hidrógeno podría terminar en un accidente con severas consecuencias.

El presente trabajo documentará lo referente a la utilización del hidrógeno como un combustible alternativo que puede sustituir a otros combustibles derivados de los hidrocarburos como la gasolina y el diésel. Esto parte de una solución al cambio climático reduciendo en manera significativa las emisiones de gases de efecto invernadero.

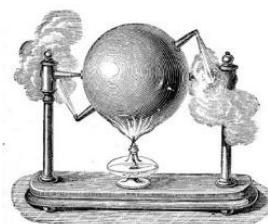
1. HISTORIA Y EVOLUCIÓN DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

1.1. Los inicios del motor de combustión

La obtención de energía mecánica, a partir de la ignición de combustibles, se produjo antes del desarrollo de las bases termodinámicas. Así, el aparato más antiguo de obtención de energía mecánica a partir del estado térmico proporcionado por el fuego data del siglo I a.C. y está descrito en los escritos de Herón de Alejandría. El aparato que posteriormente recibiría el nombre de *eolípila*, consiste en una esfera giratoria hueca provista de unos codos acodados diametralmente opuestos y orientados en sentidos opuestos que era alimentada con vapor. Este vapor entraba en las esferas a través de unos soportes huecos y al circular por los codos acodados hacia girar la esfera.

Este dispositivo usado, posteriormente en el antiguo Egipto con fines litúrgicos, constituye el primer antecedente de las turbinas de vapor modernas, aunque el principio de reacción pura por el que trabaja no se aplica a ninguna de las turbinas existentes actualmente.

Figura 1. Eolípila



Fuente: DE LOS SANTOS, Jaime. *Enseñanza de la física*. Consulta: 08 de octubre de 2014.

No se conocen más antecedentes serios de construcción de máquinas térmicas hasta finales del siglo XVII. En 1678 cuando el francés Abbe Jean de Hautefeuille, a quien la historia ha acreditado con el origen del motor de combustión con pistón, propuso usar la capacidad explosiva de la pólvora en un cilindro para mover un pistón y obtener trabajo. Sin embargo, fue solo hasta 1680 cuando los franceses Huygens y Papin lograron construir un motor de este tipo. La falta de control en la explosión, y particularmente la dificultad de cargar el cilindro con el combustible sólido entre cada carrera de trabajo, frenó el desarrollo de este motor excepto para algunas aplicaciones específicas como ciertos tipos de catapultas.

En el siglo III d.C. el sistema biela–manivela empleado en el molino de agua romano de una serrería en Hierápolis. Este mecanismo es básico en la mayoría de los motores de combustión.

En 673, la invención del fuego griego implica la fabricación, el almacenamiento y la manipulación en combate de un combustible líquido y peligroso. Y el uso de un sistema de aire forzado (por fuelles), y de válvulas de paso. En 1509 Leonardo da Vinci describe un motor atmosférico.

En 1772, Antoine Laurent Lavoisier determina la composición del aire atmosférico, explicando que era una mezcla de oxígeno y de nitrógeno. La mayoría de motores de combustión interna funcionan con aire atmosférico y, por tanto, conocer su composición es fundamental. En 1790, Antoni de Martí Franques presentó una memoria de sus experimentos sobre la composición del aire, mejorando la precisión de Lavoisier.

En 1780, Alessandro Volta inventa una pistola de juguete que dispara un tapón de corcho por la explosión de una mezcla de aire e hidrógeno inflamada por una chispa eléctrica.

1.2. Principales inventores del motor de combustión interna

Los orígenes de los motores de combustión son muy remotos. Especialmente si se consideran los inicios o precedentes de algunos elementos constitutivos de los motores, imprescindibles para su funcionamiento como tales. Considerados como máquinas completas y funcionales, productoras de energía mecánica, hay algunos ejemplos de motores antes del siglo XIX.

No fue sino hasta la producción comercial de petróleo a mediados del siglo XIX (1850) las mejoras e innovaciones fueron muy importantes. A finales de ese siglo había una multitud de variedades de motores usados en todo tipo de aplicaciones. La tabla I enmarca la evolución del motor de combustión interna desde el descubrimiento de sus principios físicos, químicos y termodinámicos, hasta la construcción de sus principales componentes.

Tabla I. **Principales inventores de los motores de combustión interna**

Año	Inventor	Construcción o patente
1807	François de Rivaz	Construye un motor propulsado por una mezcla de oxígeno e hidrógeno.
1823	Samuel Brown	Patenta el primer motor aplicado a la industria.
1824	Sadi Carnot	Publica la teoría termodinámica de los motores térmicos, con la justificación teórica de la necesidad de una compresión y aumentar la diferencia entre las temperaturas superior e inferior
1826	Samuel Morey	Obtiene una patente para un motor de gasolina o vapor sin compresión.

Continuación de la tabla I.

1838	William Barnet	Obtiene una patente para un motor con compresión dentro de un cilindro.
1839	Isaac Babbit	Inventó la aleación llamada metal babbitt usado en cojinetes hoy en día.
1854	Eugenio Barsanti y Felipe Matteucci	Inventan un motor de 4 cilindros en línea.
1856	Pietro Benini	Construye un prototipo de motor con una potencia de 5 CV.
1860	Jean Lenoir	Fábrica un motor de vapor de doble efecto con cilindro horizontal. Con cilindros, pistones, bielas, y volante. Fue el primer motor construido en serie.
1860	Philander Francis Roots y	Patentan un compresor volumétrico, que pronto fue aplicado a la sobrealimentación de motores.
1860	Christian Reithmann	Primera patente no confirmada de un motor de 4 tiempos. Queda sin confirmación en la historia.
1861	Alphose de Rochas	Primera patente confirmada de un motor de 4 tiempos.
1862	Nikolaus Otto	Empieza a fabricar un motor de gas.
1863	Nikolaus Otto	Patenta su primer motor de gas atmosférico. Y lo empieza a vender en 1864.
1867	Otto y Langen	Exhiben su motor de pistón libre en la Exposición Universal de París. Ganan el primer lugar.
1870	Siegfried Marcus	Primero en instalar un motor de gasolina en una carretilla manual.
1872	George Brayton	Solicitó una patente para un motor de combustión externa.
1876	Nikolaus Otto	En colaboración con Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach, perfeccionó el motor de 4 ciclos
1879	Nikolaus Otto	Diseña un motor con doble expansión, para aprovechar la energía que se perdía en el escape.
1879	Karl Benz	Patentó un motor de 2 tiempos basado en el motor de 4 tiempos de Alphose Rochas.
1882	James Atkinson	Patentó el motor con ciclo atkinson, que ofrecía una fase de potencia por cada revolución.
1889	Hall-Héroult	Patente para obtener aluminio por electrólisis muchas piezas de motores son de aluminio.
1891	Herbert Stuart	Inventó un motor semidiésel
1896	Karl Benz	Motor bóxer

Continuación de la tabla I.

1896	Gustav Mees	Primera patente de válvulas desmodrómicas
1900	Rudolf Diésel	Expuso su motor en la Exposición Universal de Paris. El combustible era aceite de cacahuate.
1901	George Skinner	Invento el carburador SU.
1905	Alfred Buchi	Presenta el primer turbo compresor.
1923	Tatra	Motor de 2 cilindros enfriado por aire.

Fuente: Historia del motor de combustión. www.wikipedia.org. Consulta: 08 de octubre de 2014.

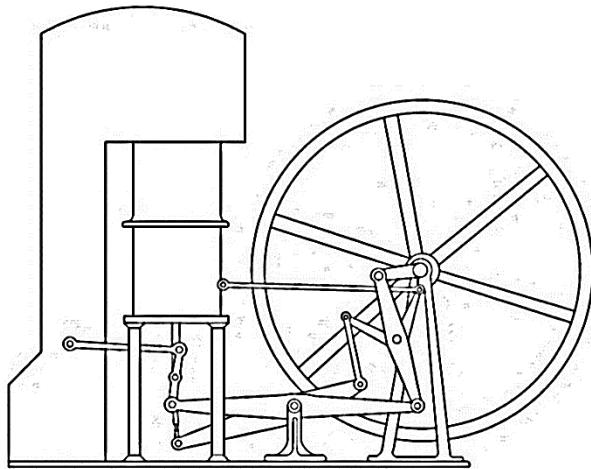
1.2.1. Motor Stirling

A pesar del éxito logrado con el desarrollo de la máquina de vapor hubo algunos intentos de emplear el aire en vez del vapor como fluido de trabajo. Esto siguiendo principios similares para desarrollar lo que se ha dado en llamar motores de aire caliente.

Así en 1759, en pleno apogeo de la máquina de H. Wood, se describía una patente en la cual decía que se podía introducir aire caliente a presión desde un horno en un cilindro y, después de enfriarlo, dejar que la presión atmosférica empujara el pistón realizando la carrera de trabajo. Aunque el señor Wood nunca logró fabricar uno de estos motores, si logró sentar las bases para la posterior aparición de los motores de aire caliente, que básicamente, reflejaron sus ideas.

Fue hasta 1816 cuando Robert Stirling patentó un motor de aire que constituye uno de los más brillantes inventos de la historia de los motores térmicos (ver fig. 2). Su diseño es aún más sorprendente si se tiene en cuenta que en esa época había todavía un conocimiento muy limitado de la naturaleza del calor y de su relación con el trabajo.

Figura 2. Esquema del motor Stirling



Fuente: AGUDELO, John. Motores Térmicos. p. 8.

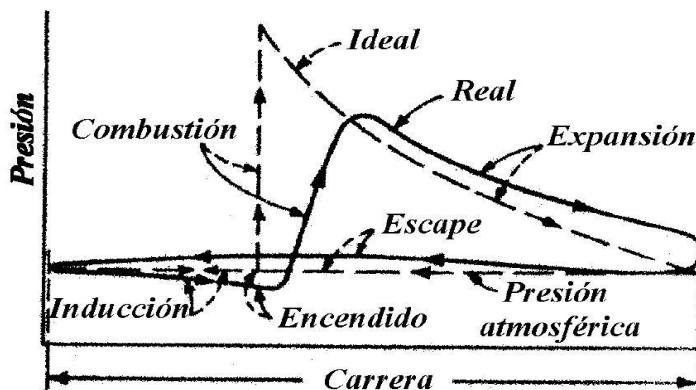
Los motores de aire caliente se dejaron de fabricar a principios del siglo pasado, eclipsados por los motores de combustión interna. Sin embargo, los avances en metalurgia y en la tecnología de transmisión de calor, han revitalizado el interés en el motor Stirling, debido principalmente a sus bajas emisiones contaminantes y bajo ruido. Así no se puede descartar que, en el futuro, este motor pueda suponer una cierta competencia para los actuales.

1.2.2. Motor de Lenoir

En 1860 el francés Étienne Lenoir desarrolló el motor de gas sin compresión (ver fig.3) fuertemente inspirado en las máquinas de vapor de la época. Se usaba una mezcla de aire y gas de hulla que se quemaba a presión atmosférica. La mezcla se admitía durante parte de la carrera de admisión a través de una válvula de corredera, cuya apertura era controlada por un sistema de varillas movido desde el cigüeñal. Cuando el pistón había realizado aproximadamente la mitad de la carrera, las válvulas se cerraban y, poco después, saltaba una chispa, originada por una bujía, lo que inflamaba la

mezcla elevando la presión que transmitía potencia al pistón durante la segunda mitad de la carrera. En la carrera de regreso se descargaban los gases del cilindro. La eficiencia de este motor era baja debido a lo corta que era la carrera de expansión y a la ausencia de compresión previa de la mezcla.

Figura 3. Diagrama presión–volumen del motor de Lenoir



Fuente: AGUDELO, John. Motores Térmicos. p. 12.

En 1866 los alemanes Otto y Langen construyeron una versión mejorada del motor de Barsanti y Matteucci, incluyendo además las mejoras del motor de Lenoir como la válvula de corredera y el encendido provocado de la mezcla. El motor Otto–Langen, como se le llamo después, empleaba un volante de inercia para subir el pistón desde la posición inferior e inducir carga fresca.

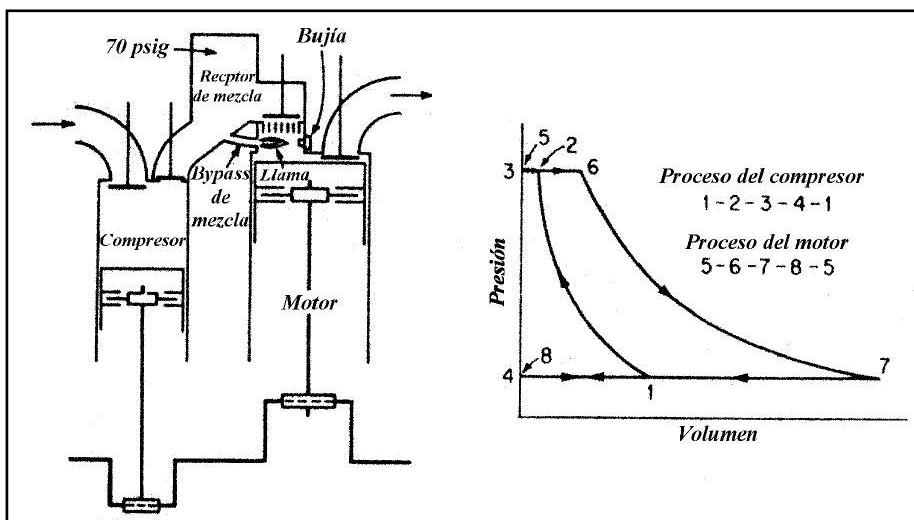
Por otra parte la válvula de corredera controlaba los procesos de admisión, escape y encendido de la mezcla mediante una llama de gas, se construyeron cerca de 5 000 motores que tenían las siguientes características:

- Potencia nominal: entre 0,25 y 3 CV
- Régimen de giro: entre 90 y 110 rpm
- Rendimiento térmico: entre 8 % y 11,2 %

1.2.3. Motor de Brayton

En 1873, el estadounidense Brayton, desarrolló un motor que tenía las características de proceso de combustión a presión constante y expansión completa. Se usaba un cilindro para comprimir aire o la mezcla aire-combustible; el otro cilindro se usaba como un cilindro de trabajo y era lo suficientemente grande para obtener la expansión completa hasta la presión atmosférica. El compresor descargaba la mezcla a una cámara, y la mezcla fluía luego de esta al motor, siendo encendida y quemada a presión constante a medida que entraba al motor.

Figura 4. Esquema del motor Brayton y representación P–V



Fuente: AGUDELO, John. Motores Térmicos. p. 12.

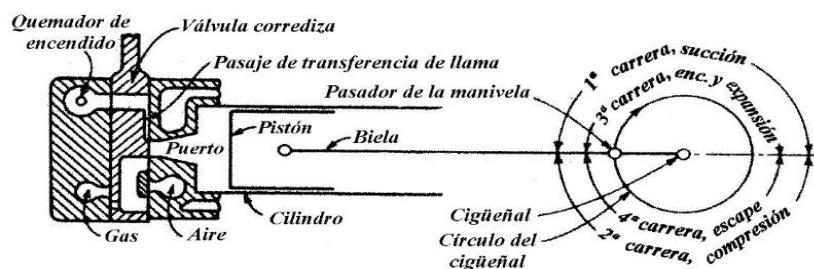
El motor Brayton, aunque construido relativamente en gran número, no representó una competencia considerable con el motor de pistón libre de Otto–Langen debido principalmente a su bajo rendimiento por las elevadas pérdidas de calor y de fricción.

1.2.4. Motor Otto

Un desarrollo más exitoso fue introducido en 1867, un motor atmosférico, por Nikolaus August Otto y Eugen Langen. Usando el aumento de la presión resultante de la combustión de la carga aire-combustible temprana hacia afuera para acelerar el pistón por lo que se su impulso genera un vacío dentro del cilindro. Entonces la presión atmosférica empuja el pistón hacia dentro, con la cremallera enganchado a través de un embrague de rodillos con el eje de salida.

La producción de estos motores, de los cuales fueron construidos alrededor de 5 000, obtuvo eficiencias térmicas de hasta 11 %. Una válvula corrediza controlaba la admisión, la ignición por llama de gas y el escape de los gases. Para superar las deficiencias de los motores de una baja eficiencia térmica y un peso excesivo, Otto propone un motor con ciclos donde el pistón tendría cuatro carreras: una carrera o tiempo de admisión, luego un tiempo de compresión antes de la ignición y expansión donde el trabajo es entregado al cigüeñal y finalmente el tiempo de escape (ver fig. 5). También propuso la incorporación de un sistema de carga de inducción estratificado.

Figura 5. Principio de operación del motor a gas de Otto



Fuente: AGUDELO, John. Motores Térmicos. p. 15.

A pesar que la patente de Otto fue invalidada en Alemania porque se basaba en los principios de Beau de Rochas, nadie lo acusó de haber copiado, sino que simplemente se pensó que a le había ocurrido el ciclo de cuatro tiempos 14 años después que a Beau de Rochas. Las repercusiones de este litigio llegan hasta la actualidad, que el ciclo de cuatro tiempos se conoce en Francia como el ciclo de Beau de Rochas, mientras que, en el resto del mundo, se le llama ciclo Otto.

En 1885 se implementaron en el motor Otto dos mejoras significativas: el sistema de encendido eléctrico de la mezcla por magneto y el carburador de superficie para vaporizar el combustible líquido. Ya para 1890 se habían vendido cerca de 50 000 de estos motores en Europa y Estados Unidos.

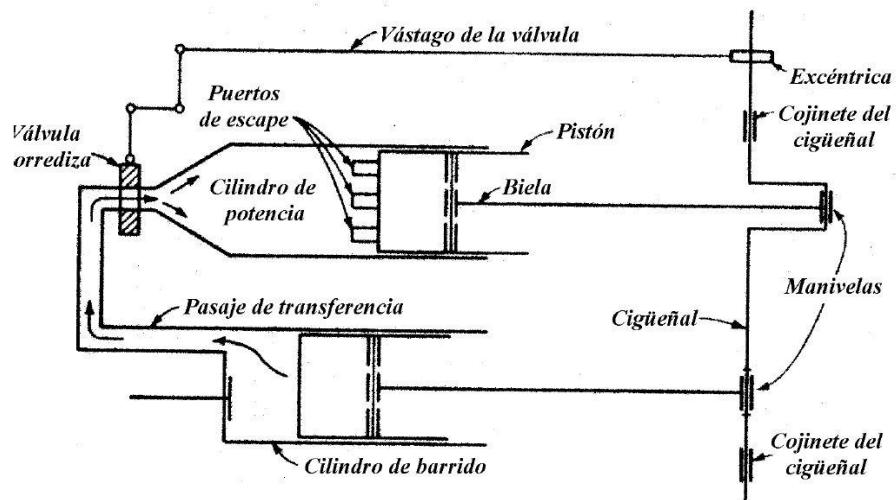
1.2.4.1. Motor de dos tiempos

De las cuatro carreras descritas en los principios de Beau de Rochas, solamente en una se obtenía trabajo. Esto es lo mismo que decir que de las dos revoluciones que tiene que dar el motor, solamente en una de ellas se logra suministrar potencia al cigüeñal. Este principio llevó al desarrollo del motor de dos tiempos. A pesar de intentos previos fue realmente el inglés Clerk quien en 1878 logró construir el primer motor de dos tiempos de la historia.

Como se ve en la figura 6, el motor consistía en dos cilindros separados. El más pequeño contenía el pistón que bombeaba carga fresca al cilindro mayor, desplazando esta los productos de la carga previa que se escapaba a través de puertos en las paredes del cilindro.

Los motores de dos tiempos de compresión en carcasa se usan más comúnmente debido a su bajo costo y pequeño tamaño especialmente en motores de fuera de borda y en motocicletas. Los motores de dos tiempos con soplador de barrido independiente se emplean en motores grandes para trabajo pesado. En la actualidad los primeros tienden a desaparecer del mercado por su excesiva descarga de emisiones contaminantes a la atmósfera.

Figura 6. Motor de dos tiempos de Clerk



Fuente: AGUDELO, John. Motores Térmicos. p. 16.

1.2.4.2. Motor de cuatro tiempos

Como se había mencionado con anterioridad el motor de cuatro tiempos se le debe a dos inventores. El primero en 1862 fue el francés Beau de Rochas. El segundo, en 1875, fue el alemán Nikolaus August Otto.

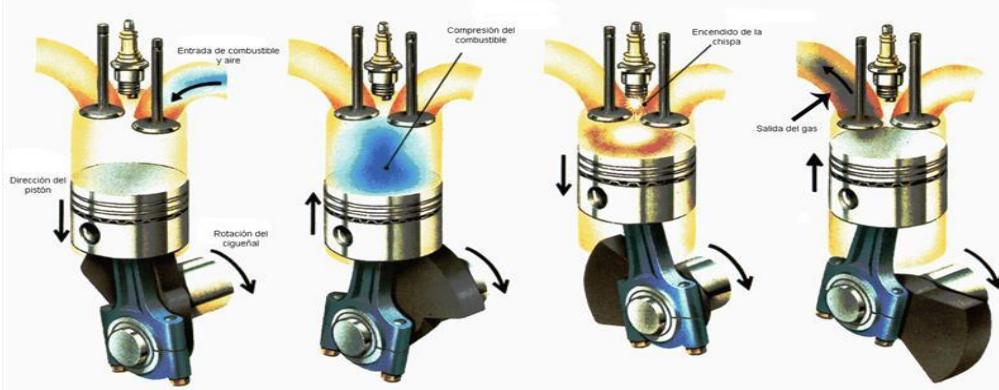
Se denomina motor de cuatro tiempos al motor de combustión interna tanto de ciclo Otto como ciclo diésel, que precisa de cuatro carreras del pistón o

émbolo para completar el ciclo termodinámico de combustión. Estos cuatro tiempos son:

- Admisión: en esta fase el descenso del pistón aspira la mezcla aire-combustible en los motores a gasolina o el aire en motores diésel. La válvula de escape permanece cerrada, mientras que la de admisión está abierta. En el primer tiempo el cigüeñal gira 180º y el árbol de levas da 90º y la válvula de admisión se encuentra abierta y su carrera es descendente. Véase figura 7.
- Compresión: al llegar al final de la carrera inferior (PMI), la válvula de admisión se cierra, comprimiéndose el gas contenido en la cámara por el ascenso del pistón. En el 2º tiempo el cigüeñal da 360º y el árbol de levas da 180º. Además ambas válvulas se encuentran cerradas y su carrera es ascendente.
- Expansión: al llegar al final de la carrera superior (PMS) el gas ha alcanzado la presión máxima. En los motores a gasolina salta la chispa en la bujía, provocando la ignición de la mezcla. Mientras que en los motores diésel se inyecta a través de un inyector el combustible muy pulverizado, que se autoinflama por la presión y temperatura existentes en el interior del cilindro. En ambos casos, una vez iniciada la combustión, esta progresó rápidamente incrementando la temperatura y la presión en el interior del cilindro y expandiendo los gases que empujan el pistón. Esta es la única fase donde se obtiene trabajo.
- Escape: en esta fase el pistón empuja, en su movimiento ascendente, los gases de la combustión que salen a través de la válvula de escape que permanece abierta. Al llegar al punto máximo de carrera superior se

cierra la válvula de escape y se abre la de admisión, reiniciándose el ciclo. Es este tiempo el cigüeñal gira 180º y el árbol de levas gira 90º.

Figura 7. **Tiempos del ciclo de combustión**



Fuente: Ciclos de motor de combustión. www.autocosmos.com. Consulta: 9 de octubre de 2014.

1.2.5. Motor Diésel

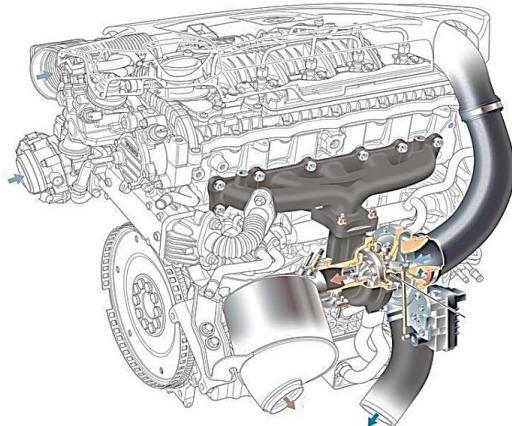
En 1892 el alemán Rudolf Diésel, basado en que el trabajo de compresión rápida en un medio incrementa su energía interna y su temperatura, propuso comprimir solo aire hasta que alcanzara una temperatura lo suficientemente elevada para que lograra encender el combustible que se inyectaría hacia el final de la carrera de compresión. Propuso, igualmente, coordinar el ritmo de inyección de combustible con el movimiento del pistón de tal forma que el calor de la combustión fuera liberado a una temperatura máxima constante.

De esta forma, el proceso original fue concebido lo más cercano posible al ciclo del motor de Carnot. Sin embargo, razones económicas llevaron a que el proceso se realizara como una aproximación a un proceso de combustión a presión constante para motores diésel grandes de baja velocidad.

El motor diésel admite y comprime hasta un instante antes de iniciarse la inyección del combustible. Únicamente aire, esto permitió tener relaciones de compresión mucho más elevadas que las de todos los motores de la época, (los cuales presentaban problemas de detonación de la premezcla aire-combustible al interior de la cámara de combustión, debido a las características propias del combustible que empleaban). Por tanto se obtuvo un rendimiento más elevado y un menor consumo de combustible.

Se puede afirmar que después de la aparición del motor diésel se completó el desarrollo básico de los motores de combustión interna alternativos con respecto a su concepción mecánica. El diseño de estos motores, durante el siglo actual, ha estado marcado por la mejora de prestaciones (potencia y rendimiento–consumo, sobre todo), conseguida en gran parte por el importante desarrollo de los combustibles, en especial en el periodo que siguió a la Segunda Guerra Mundial con el descubrimiento de sustancias antidetonantes, que condujo a un mayor conocimiento de la forma como la naturaleza del combustible afectaba la combustión.

Figura 8. **Motor diésel moderno**



Fuente: Motor Diésel 2009. Arpem Networks, S.L. Consulta: 12 de octubre de 2014.

1.2.6. Motor Wankel

Hacia 1959 el ingeniero alemán Federico Wankel inventaba un nuevo motor de combustión interna cuyo principio no era alternativo sino rotativo. Es un motor de encendido provocado mecánicamente distinto a los anteriores mencionados. Como se muestra en la figura 9, este motor consta de un cárter provisto de una cámara de forma especial dentro de la cual gira un émbolo rotativo que tiene forma de triángulo curvilíneo. El émbolo está dotado de un dentado interior que engrana con un piñón solidario al cigüeñal del motor, sobre el cual gira el émbolo excéntricamente.

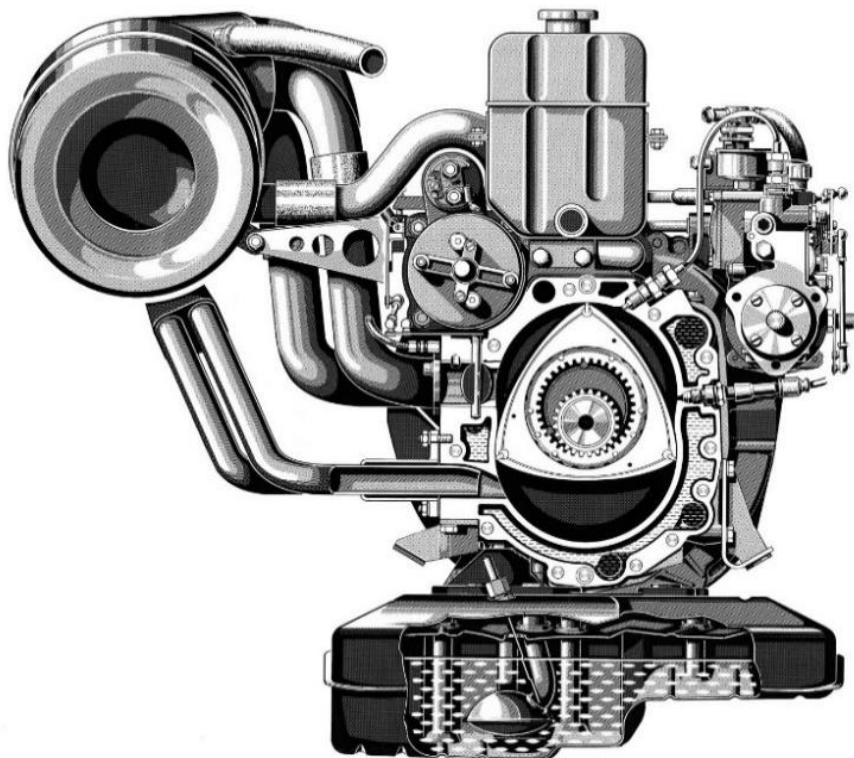
La gran ventaja del motor Wankel, como se le suele llamar en memoria a su inventor, consiste en que sus piezas no suben ni bajan, si no que giran. Pesa menos, es más compacto y tiene menor número de partes móviles que el motor convencional. El eje de salida gira al triple de velocidad que el rotor triangular. El rotor mantiene sus tres vértices en continuo contacto con la superficie interior lo que hace difícil el sellado de las cámaras de combustión.

Entre otras desventajas se encuentran las elevadas fugas y las grandes pérdidas por transferencia de calor. Actualmente este tipo de motores lo llevan los japoneses Mazda en su serie RX. A nivel experimental, esta misma casa ha sacado el Mazda Miata de hidrógeno con motor Wankel, conocido como el MX-5.

Este tipo de motor parece dar buenos resultados al emplear hidrógeno como combustible, según ensayos realizados con dinamómetro, una vez resueltos los problemas que presentaba en lo que a estanqueidad se refiere. Estos buenos resultados se deben a la configuración de este motor, el cual

minimiza las dificultades de combustión que se dan en otros motores de combustión interna.

Figura 9. **Motor Wankel**



Fuente: FRANCO, Daniel. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas*. p. 94.

1.2.7. Clasificación de los motores por aplicación

La clasificación del motor de combustión interna se realiza al tomar en cuenta ciertos aspectos mecánicos y factores que intervienen en el funcionamiento para conocer las clases comunes de motores que existen, se presenta la tabla II.

Tabla II. Clasificación de los motores

Tipo de Aplicación	Tipo de Motor
Ciclo	Otto Diésel Lenoir Brayton Wankel
Disposición y numero de cilindros	En Línea 1,2,3,4,5,6 En W 8,12,16 En V 2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,24 Radial 3,5,7,9,11

Fuente: elaboración propia.

Existen muchos tipos diferentes de motores de combustión interna; los cuales pueden ser clasificados por:

- Aplicación: automóviles, camiones, trenes, barcos, aviones, sistemas portátiles de energía, moto generadores y otros.
- Diseño básico del motor: motores reciprocatos y motores rotativos.
- Ciclos de trabajo: de cuatro ciclos: naturalmente aspirados, súper cargados y turbo cargados. El de dos ciclos: con expulsado de gases del cárter, súper cargado y turbo cargado.
- Tipo de válvulas: de seta en la culata, cabeza en L, cabeza en T, cabeza en F, camisa rotativa y lumbreras.

- Tipo de combustible: gasolina, diésel, gas LP, alcoholes (metanol y etanol), hidrógeno y combinación de combustibles.
- Método de preparación de la mezcla: carburador, inyección indirecta, inyección directa en el cilindro del motor.
- Método de ignición: chispa y compresión.
- Diseño de la cámara de combustión: cámara abierta (disco, cuña, hemisferio, tazón en pistón), cámara dividida (cámara auxiliar pequeña y grande un ejemplo: cámara de remolino y precámara).
- Método de control de carga: estrangulamiento del combustible y aire juntos hacen que la composición de la mezcla sea homogénea, control solamente del combustible y una combinación de este.
- Método de enfriamiento: por agua, por aire y sin enfriamiento (esto quiere decir por convección natural y radiación de calor).

Tabla III. Clasificación de los motores de combustión por aplicación

Clase	Servicio	Rango aproximado de potencia del motor en kW	Características predominantes		
			G o D	Ciclos	Tipo de Enfriamiento
Vehículos de carretera	Motocicletas	0,75 – 70	G	2 o 4	A
	Carro liviano	15 – 75	G	4	A,W
	Buses	75 – 200	G	4	W

Continuación de la tabla III.

	Camiones	35 – 150	G,D	4	W
	Tráiler	120 – 400	D	4	W
Vehículos fuera de carretera	Carro Liviano	1,5 – 15	G	2 o 4	A,W
	Agricultura	3 - 150	G,D	2 o 4	A,W
	Movimiento de tierra	40 - 750	D	2 o 4	W
	Militares	40 – 2 000	D	2 o 4	A,W
Sobre rieles	Carros de riel	150 - 400	D	2 o 4	W
	Locomotoras	400 – 3 000	D	2 o 4	W
Marina	Motor fuera de borda	0,4 - 75	G	2	W
	Motor dentro de borda	4 – 750	G,D	4	W
	Barcos ligeros Navales	30 – 2 200	D	2,4	W
	Barcos	3500 – 22 000	D	2,4	W
	Barcos Auxiliares	75 – 750	D	4	W
Aeronaves	Aviones	45 – 2 700	G	4	A
	Helicópteros	45 – 1 500	G	4	A
Uso del hogar	Cortadora de Céspedes	0,7 – 3	G	2 o 4	A
	Barredora de nieve	2 – 5	G	2 o 4	A
	Tractores pequeños	2 – 8	G	4	A
Estacionarios	Servicios de construcción	7 – 400	D	2 o 4	W

Fuente: HEYWOOD, John. *Internal Combustion engine fundamentals*. p. 7.

1.3. Partes principales de un motor de combustión de 4 tiempos

El motor de combustión interna es una máquina que convierte la energía química del combustible en energía mecánica a través de la combustión. Estas son las partes que intervienen en el funcionamiento de un motor de combustión.

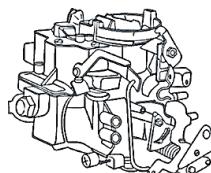
1.3.1. Carburador

Es el dispositivo más común usado para controlar el flujo de combustible en el *manifold* de admisión y distribuir el combustible a través de la corriente de aire. En un carburador, el aire fluye a través de una tobera divergente unificada llamada Venturi. Ver figura 10.

El carburador debe atomizar o rociar el combustible por medio de sus válvulas de aguja y mezclar completamente este con el aire. Los carburadores son diseñados para entregar la mezcla al motor en proporciones correctas, cualquiera que sea la condición de operación del motor.

El combustible entra en la corriente de aire a través del tubo de descarga de combustible o puertos en el cuerpo de carburador y se atomiza y por convección por la corriente de aire más allá de la placa del acelerador y en el colector de admisión.

Figura 10. Carburador



Fuente: RODRÍGUEZ, José. *Vectorización del carburador*. Consulta: 12 de octubre de 2014.

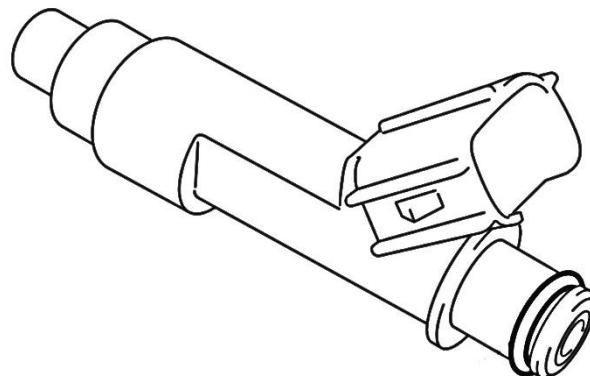
1.3.2. Inyector

Es un elemento del sistema de inyección de combustible cuya función es introducir una determinada cantidad de combustible en la cámara de combustión en forma atomizada, distribuyéndolo lo más homogéneamente posible dentro del aire contenido en la cámara. No se debe permitir el goteo posterior de combustible.

Los inyectores se encuentran ubicados en la cabeza del cilindro estando compuestos de dos partes de alta precisión: cuerpo y aguja. Estos poseen rebajes que permiten una mayor transferencia de calor con el combustible. Son de acero de alta calidad y han sido sometidos a un ajuste finísimo.

Los huecos de bombas y entre la aguja y el cuerpo de los inyectores son de tres micrones y llevan un filtro de dos micrones, el cual sirve para que las partículas desprendidas de las paredes interiores del tubo de alta presión no ingresen al inyector.

Figura 11. Inyector común de gasolina



Fuente: Toyota Motor Company. *Engine Mechanical*. p. 178.

1.3.3. Pistón

Los pistones forman la parte inferior de la cámara de combustión en el cilindro. El pistón transfiere al cigüeñal, la potencia generada al quemar la mezcla de aire-combustible. La parte superior del pistón se conoce como cabeza del pistón. La parte superior del pistón contiene varias ranuras donde se instalan los anillos de compresión y de aceite. La parte inferior del pistón, debajo de las ranuras de los anillos, se llama falda.

Las superficies de empuje de la falda del pistón, lo guían en el diámetro interior del cilindro e impiden que se mueva hacia uno u otro lado en el cilindro. La mayoría de los pistones tienen una marca en un lado o en la parte superior para identificar el lado del pistón que queda hacia el frente del motor. El perno del pistón se inserta a través del orificio del pistón para conectarlo a la biela.

El pistón debe ser diseñado de forma tal que permita una buena propagación del calor, para evitar las altas tensiones moleculares provocadas por las altas temperaturas en diferentes capas del material. En caso contrario, una mala distribución del calor causaría dilataciones desiguales en distintas partes del pistón ocasionando así roturas del mismo.

Es común el uso de cabezas de acero fundido en motores de gran potencia, manteniendo el cuerpo cilíndrico de hierro fundido. Generalmente, para la construcción del pistón se emplea la fundición de grano fino, pero cuando es necesario fabricarlo de dos o más partes se usa el fondo de acero fundido para resistir mejor las tensiones producidas por el calor. Los pistones se construyen en una gran variedad de materiales siendo los más comunes:

- Hierro fundido
- Aleación de níquel y hierro fundido
- Aleación de acero y aleación de aluminio

Se utiliza la aleación de hierro fundido al 64 % y níquel al 36 % con muy poco carbono y algo de cromo. El coeficiente de dilatación de esta combinación es prácticamente nulo, con lo cual se consigue limitar la dilatación del pistón.

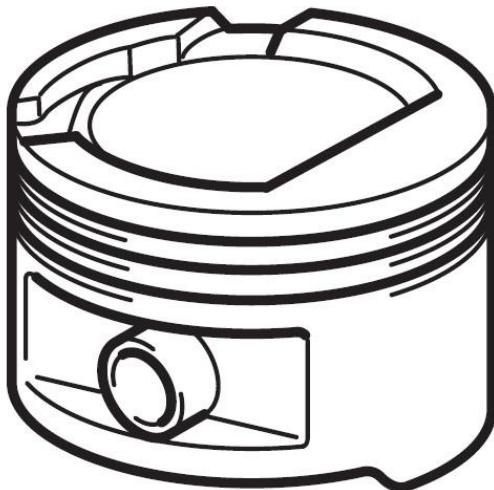
El pistón de fundición se utiliza en motores pequeños. Poseen la ventaja de tener una elevada resistencia mecánica y gran capacidad para trabajar sin fricción. Los pistones de aluminio son mucho más ligeros y tienen un alto coeficiente de transmisión de temperatura. Por ende requieren menos agua de refrigeración que los émbolos de fundición.

Los pistones de hierro común utilizados en motores de baja y media velocidad, aumenta la elasticidad a prueba de deformación permanente y resistencia al desgaste. Es preferible a las aleaciones livianas, ya que permiten emplear espacios nocivos menores en los pistones, lo cual constituye un detalle valioso tratándose de motores grandes que funcionan con carga variable.

Básicamente existen dos métodos de fabricación de los pistones: fundidos y forjados.

Dependiendo de la cantidad necesaria a producir y especialmente de los esfuerzos y temperaturas, a los cuales estarán sometidos (sea un motor diésel o gasolina) se elige uno u otro método. Los pistones forjados tienen una mayor resistencia mecánica. Luego llevan varios mecanizados que son los que determinan la forma final del pistón. Estos mecanizados son hechos en un torno de CNC.

Figura 12. **Cabeza de pistón**



Fuente: Toyota Motor Company. *Engine Mechanical*. p. 75.

1.3.4. **Culata**

La culata, tapa de cilindros, cabeza de motor o tapa del bloque de cilindros es la parte superior de un motor de combustión interna que permite el cierre de las cámaras de combustión.

Son varias las disposiciones que se han dado con las configuraciones de la culata, según el tipo de motor, siendo la más sencilla la del motor de dos tiempos refrigerado por aire. En ella, literalmente la tapa del cilindro es atravesada por el orificio roscado para colocar la bujía y por una de sus caras tiene las aletas de refrigeración que buscan una mayor área de contacto con el elemento refrigerante que en este caso es el aire.

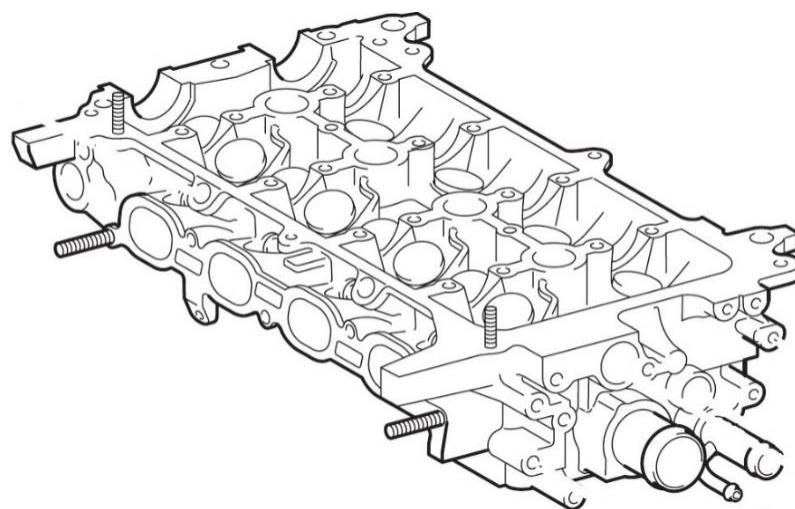
Los motores antiguos refrigerados por agua, pero con válvulas en el bloque, son también sencillamente una pieza de fundición hueca que en su

interior conduce el elemento refrigerante que en este caso es el agua. Las cabezas de los motores son muy diferentes en cuanto a material a comparación del monobloque.

Posteriormente, para aumentar la eficiencia del motor, los diseñadores fueron ubicando en la culata las válvulas y el tren de balancines que las accionan para permitir la entrada y salida de gases a la cámara de combustión y en consecuencia también orificios o lumbreras de conducción de dichos gases. Más recientemente se desplazaron los ejes de levas desde el bloque para configurar el componente complejo de hoy en día.

La culata se construye de hierro fundido, aluminio o en aleaciones ligeras, y se une al bloque del motor mediante tornillos y un empaque. Se construye con estos elementos porque el sistema de enfriamiento debe ser rápido, y estos elementos se enfrian rápidamente.

Figura 13. **Culata**



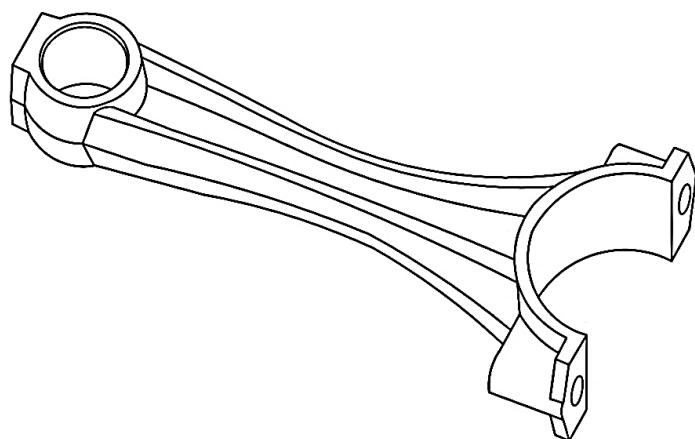
Fuente: Toyota Motor Company. *Engine Mechanical*. p. 210.

1.3.5. Biela

Son un elemento básico en los motores de combustión interna. Se diseñan con una forma específica para conectarse entre las dos piezas, el pistón y el cigüeñal. Sus sección transversal o perfil puede tener forma de H o I. el material del que se fabrican es de una aleación de acero, titanio o aluminio. En la industria del automóvil todas son fabricadas por forja, pero algunos fabricantes de piezas las hacen mediante mecanizados CNC.

Los principales esfuerzos que sufre la biela son de flexión compuesta en el momento de la carga máxima al explotar la mezcla combustible. La compresión estaría dada por la competente de la fuerza sobre el eje longitudinal de la biela, y la flexión por la componente transversal a la misma, y por lo mismo el par reactivo proporcionado por la carga a través del cigüeñal al oponerse al movimiento. Además la biela sufre un esfuerzo de compresión nuevamente en la etapa de compresión de la mezcla.

Figura 14. **Biela tipo H**



Fuente: Biela de motor de combustión. www.stlfinfer.com. Consulta: 18 de octubre de 2014.

1.3.6. Válvulas

Se usan en los motores de combustión interna para controlar el ciclo de admisión y escape en la culata de cilindros. La válvula es usualmente un disco plano de metal con un vástago largo. El vástago es usado para empujar el disco de metal hacia abajo y abrir la válvula; posee un resorte que generalmente se usa para cerrar la válvula cuando la leva no presiona el vástago. Las válvulas son cerradas por un mecanismo que actúa sobre el vástago en lugar de hacerlo un resorte, y son usadas en algunos motores de autos de carreras y motos de alta velocidad, eliminando el flotado de válvulas que ocurre a altas revoluciones.

Para determinadas aplicaciones el vástago de la válvula y el disco son de aceros de diferentes aleaciones, o los vástagos de las válvulas son huecos y llenos de sodio para mejorar el transporte y la transferencia de calor.

A pesar que es un mejor conductor del calor, la culata de aluminio requiere que el asiento de la válvula sea un inserto de acero; mientras que las culatas de fundición de hierro a menudo usan un asiento integral, formando parte de la culata.

Debido a que el vástago de la válvula se extiende hasta la cámara de las levas para ser lubricado, debe ser sellado para evitar que pasen los gases provenientes del cilindro. Un retén o sello con labios de goma evitan que excesivas cantidades de aceite entren en el ciclo de admisión, y que desde el ciclo de escape suban los gases a la cámara del o los árboles de levas. Cuando estos sellos se gastan, es común ver humo azulado en el escape cuando presionamos el acelerador.

La metalurgia de los primeros motores no era lo que es hoy en día, y el rápido abrir y cerrar de las válvulas contra la culata de cilindros producía su rápido desgaste. Era necesario reemplazarlas cada dos años o más, era un proceso caro y costoso. Agregar tetraelito de plomo a la gasolina reducía el problema en alguna medida, debido a que se formaba una película de plomo en el asiento, actuando como lubricante del metal. Al construir los asientos de válvulas con una aleación mejorada de acero al cromo–cobalto hizo que este problema desapareciera completamente e hizo innecesaria la gasolina con plomo.

Figura 15. **Válvulas para motor Diésel**



Fuente: Soluciones inteligentes. *Válvulas*. Consulta: 18 de octubre de 2014.

1.3.7. **Eje de levas**

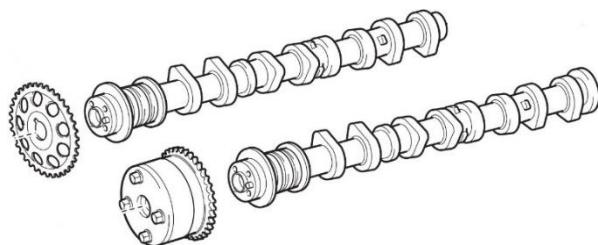
El eje o árbol de levas controla los eventos de apertura y cierre de las válvulas. El cigüeñal acciona al árbol de levas mediante una conexión de engranajes, de cadena o de correa. El árbol de levas gira a la mitad de la velocidad del cigüeñal para mantener el tiempo correcto de los cuatro ciclos de

la combustión. Los eventos de apertura y cierre se llevan a cabo mediante los lóbulos de levas en el árbol de levas. Cada válvula en el motor tiene su correspondiente lóbulo de árbol de levas. Dependiendo del diseño del motor, puede haber un árbol de levas o varios árboles en un motor.

Las poleas de árbol de levas conectadas a la cadena o correa impulsan a cada árbol de levas. La polea de la banda de tiempo en el cigüeñal tiene la mitad de los dientes que tienen las poleas de los árboles de levas, así pues, los árboles de levas giran una vez por cada dos giros del cigüeñal. Los impulsores tipo OHC también incluyen una polea de tensión o un resorte tensor que mantiene la tensión en la cadena o en la correa y la sincronización de las válvulas.

Los diseños modernos de motores de combustión interna tienen el árbol de levas en la culata de cilindros, presionando directamente el vástago de la válvula (a través de taqués); si el motor tiene un solo árbol de levas, es un motor *SOHC* (*single overhead camshaft*, árbol de levas simple a la cabeza). A menudo hay dos árboles de levas, uno para las válvulas de admisión y otro para las de escape, creando un sistema *DOHC* (*dual overhead camshaft*, doble árbol de levas a la cabeza).

Figura 16. **Sistema de árbol de levas DOHC**



Fuente: Toyota Motor Company. *Engine Mechanical*. p. 295.

1.3.8. Cigüeñal

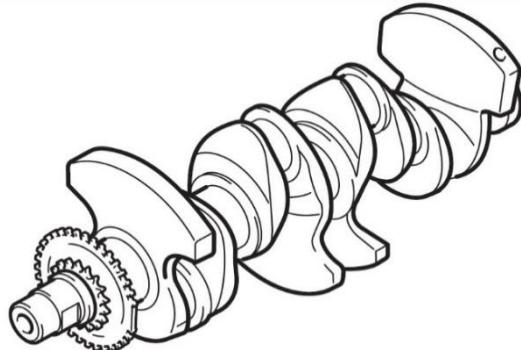
Este transforma el movimiento hacia arriba y hacia abajo de los pistones en un movimiento giratorio, que se requiere para impulsar las ruedas del vehículo. El cigüeñal se monta en el *monoblock* en soportes en forma de "U" que se funden en el conjunto del *monoblock*. Las tapas, llamadas tapas de cojinetes principales, se atornillan sobre los soportes para fijar el cigüeñal sobre el bloque. Entre el cigüeñal y sus superficies de montaje se tienen metales de cojinete que sostienen y detienen el cigüeñal y le permiten girar.

El cigüeñal soporta las fuerzas de los impulsos producidos por las carreras de explosión en los pistones. El cigüeñal generalmente se fabrica de hierro fundido pesado y de alta resistencia.

Los cigüeñales hechos para aplicaciones de alto rendimiento o de servicio pesado generalmente se fabrican de acero forjado. Algunos cigüeñales incluyen contrapesos fundidos en posición opuesta a los muñones de las bielas del cigüeñal. Los contrapesos permiten equilibrar el cigüeñal e impedir las vibraciones durante la rotación a alta velocidad.

Normalmente se fabrican aleaciones capaces de soportar los esfuerzos a los que se ven sometidos y pueden tener perforaciones y conductos para el paso de lubricante. Sin embargo, estas aleaciones no pueden superar una dureza de 40 *Rockwell C* (40 RHC), debido a que cuanto más dura es la aleación, más frágil se convierte la pieza y se podría llegar a romper debido a las grandes fuerzas a las que está sometida.

Figura 17. Cigüeñal para motor de 4 cilindros



Fuente: Toyota Motor Company. *Engine Mechanical*. p. 49.

1.3.9. Catalizador

Es un dispositivo diseñado para controlar la emisión de los gases de efecto invernadero provocado por la quema de combustibles fósiles en los vehículos que poseen un motor de combustión interna. El trabajo del catalizador es reducir los subproductos tóxicos a sustancias menos tóxicas por medio de reacciones químicas catalizadas. La mayoría de los vehículos modernos de hoy en día utilizan el catalizador de tres vías, llamado así por convertir los tres contaminantes principales en el escape de los automóviles: monóxido de carbono, hidrocarburos sin quemar, y óxidos de nitrógeno. Los dos primeros son sometidos a combustión catalítica y el último se reduce de nuevo a nitrógeno.

El catalizador fue inventado por Eugene Houdry, un ingeniero mecánico francés y experto en la refinación de petróleo, vivió en los Estados Unidos alrededor de 1950. Cuando se publicaron los resultados de los primeros estudios de smog en Los Ángeles, Houdry comenzó a preocuparse por el smog

de las chimeneas y escapes de los automóviles en la contaminación del aire y fundó una compañía, Oxy Catalyst.

1.3.9.1. Principales materiales para la construcción de catalizadores

Para los convertidores catalíticos de automóviles, el núcleo es generalmente un monolito de cerámica con una estructura de nido de abeja. Los monolitos de lámina metálica hechos de FeCrAl se utilizan en algunas aplicaciones, debido al costo elevado. Núcleos de cerámica son de bajo costo cuando se fabrican en grandes cantidades. Núcleos metálicos son de menor costo al construirse en pequeñas cantidades, y se utilizan en los automóviles deportivos de los que se requiere una baja presión y de alta fiabilidad bajo carga continua. Un revestimiento delgado es un portador para los materiales catalíticos y se usa para dispersar los materiales sobre un área de superficie alta. Óxido de aluminio, dióxido de titanio, dióxido de silicio, o una mezcla de sílice y de alúmina pueden ser utilizados en la construcción de catalizadores.

Los materiales catalíticos se suspenden en el revestimiento delgado antes de aplicarse al núcleo. Los materiales de revestimiento delgado se seleccionan para formar una superficie irregular áspera, ocasionando un aumento en gran medida del área de superficie en comparación con la superficie lisa del sustrato desnudo. Esto a su vez maximiza en la superficie catalíticamente activa disponible para reaccionar con los gases de escape del motor. La capa debe mantener su área de superficie y evitar la sinterización de las partículas metálicas catalíticas incluso a altas temperaturas.

El catalizador en sí es más a menudo un metal precioso. El platino es el catalizador más activo y es ampliamente utilizado, pero no es adecuado para

todas las aplicaciones debido a reacciones adicionales no deseadas y de alto costo. El paladio y el rodio son otros dos metales preciosos utilizados. El rodio se utiliza como un catalizador de reducción, el paladio se utiliza como un catalizador de oxidación, y el platino se utiliza tanto para la reducción y la oxidación. Cerio, hierro, manganeso y níquel también se utilizan, aunque cada uno tiene sus propias limitaciones. El níquel no es legal para su uso en la Unión Europea. El cobre puede ser utilizado en todas partes excepto América del Norte, donde su uso es ilegal debido a la formación de dioxinas.

1.3.9.2. Tipo de catalizadores

De dos vías: este tipo de convertidor catalítico es ampliamente utilizado en los motores diésel para reducir las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono. También fueron utilizados en los motores de gasolina para los automóviles estadounidenses y canadienses al mercado hasta 1981. Debido a su incapacidad para controlar el óxido nitroso, desde entonces los convertidores de dos vías fueron reemplazados por los convertidores de tres de vías. En este catalizador ocurren dos reacciones simultáneas:

- Oxidación de monóxido de carbono a dióxido de carbono: $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$.
- Oxidación de hidrocarburos no quemados o parcialmente quemados a dióxido de carbono y agua: $\text{C}_x\text{H}_{(2x+2)} + [(3x+1)/2]\text{O}_2 \rightarrow x\text{CO}_2 + (X+1)\text{H}_2\text{O}$.

En estos catalizadores el NOx se elimina con la recirculación de gases de escape (EGR).

De tres vías: tienen la ventaja de controlar las emisiones de óxido nitroso, en particular, el óxido nitroso es un gas de efecto invernadero trescientas veces

más potente que el dióxido de carbono y en la actualidad es la mayor sustancia que reduce el ozono. Un convertidor catalítico de tres vías tiene tres tareas simultáneas:

- Reducción de óxidos de nitrógeno a nitrógeno y oxígeno: $2\text{NO}_x \rightarrow x\text{O}_2 + \text{N}_2$.
- La oxidación de monóxido de carbono a dióxido de carbono: $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$.
- La oxidación de hidrocarburos no quemados a dióxido de carbono y agua: $\text{C}_x\text{H}_{(2x+2)} + [(3x+1)/2]\text{O}_2 \rightarrow x\text{CO}_2 + (x+1)\text{H}_2\text{O}$.

Estas tres reacciones se producen más eficazmente cuando el convertidor catalítico recibe del escape de un motor de combustión interna, funcionando ligeramente por encima del punto estequiométrico. Este punto se encuentra entre 14,6 y 14,8 partes de aire por 1 parte de combustible, en peso, de la gasolina. La proporción de gas, gas natural y los combustibles de etanol es cada una ligeramente diferente, esto requiere una ligera modificación al sistema para usar estos combustibles.

1.3.9.3. Ayuda ambiental negativa de los catalizadores

Los convertidores catalíticos han demostrado ser fiables y eficaces en la reducción de las emisiones de gases nocivos del escape. Sin embargo, también tienen algunas deficiencias y un impacto ambiental negativo. Esto quiere decir que los catalizadores son solamente parte de la solución al cambio climático.

Aunque los catalizadores son eficaces en la eliminación de hidrocarburos y otras emisiones nocivas, no reducen las emisiones de dióxido de carbono CO₂. Uno de los gases de efecto invernadero indicados por el Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, que es la principal causa del calentamiento global.

Un motor de combustión interna equipado con un catalizador de tres vías debe ejecutarse en el punto estequiométrico, lo que significa que las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) aumentan relativamente con una mezcla pobre. No obstante los motores de combustión interna equipados con catalizadores producen gases de escape más limpios que los motores de combustión interna de mezcla pobre.

La producción de catalizadores requieren paladio o platino, parte de la oferta mundial de estos metales preciosos se producen cerca de Norilsk, Rusia. Aquí, la industrialización ha causado que este lugar se añada a la lista de la revista *Time* de los lugares más contaminados del mundo.

1.3.10. Volante de inercia

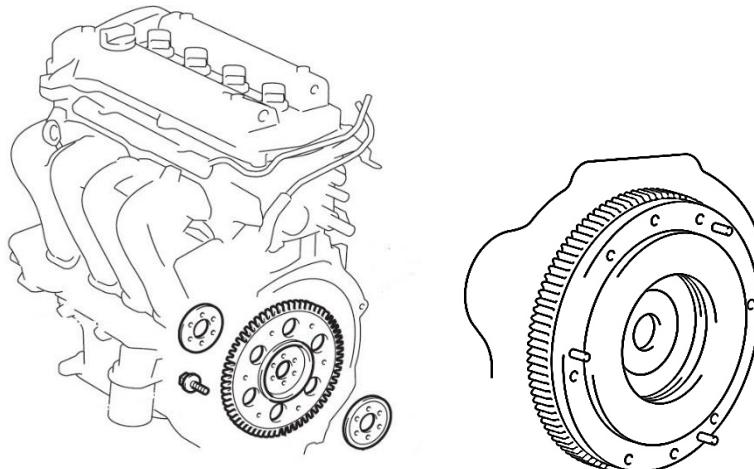
El volante de inercia es un disco dentado de acero que ayuda al motor de combustión interna a almacenar energía cinética. El volante no permite que el pistón pierda energía mientras este retorna de un modo pasivo ya sea en el punto muerto superior como en el punto muerto inferior. También suaviza el funcionamiento del motor, aumentando la masa en movimiento lo que favorece la entrega de par. Se coloca en un extremo del cigüeñal y sirve de apoyo al embrague. Tiene una gran masa y su funcionamiento consiste en recoger parte de la energía que se produce durante la carrera de expansión para

cederla posteriormente en las demás carreras del pistón donde no se produce trabajo. Su masa depende del número de cilindros, siendo más pequeño cuantos más cilindros tiene el motor (la energía la aportan las carreras de expansión de los otros cilindros). Su principal inconveniente es el freno que opone al motor para conseguir rápidas aceleraciones.

También se utilizan como frenos regenerativos en vehículos, generalmente eléctricos (aprovechan la energía de la frenada del vehículo). Resulta una manera limpia y sencilla de almacenamiento de energía, aunque evidentemente, la viabilidad del empleo de volantes de inercia depende de algunos factores tales como el número de ciclos de vida, los costos de fabricación y explotación y los materiales empleados.

El arranque del motor se facilita con un volante de gran momento de inercia, porque el mismo acumula en la primera fase útil mayor energía para superar rápidamente las fases pasivas que preceden a la combustión siguiente.

Figura 18. **Volante**



Fuente: Toyota Motor Company. *Engine Mechanical*. p. 65.

1.3.11. Escape

El tubo de escape de un vehículo con motor de combustión interna sirve para evacuar los gases de la combustión, desde el motor hacia el exterior del vehículo, una vez que el motor ha realizado la combustión de la gasolina o diésel. Asimismo, se encarga de amortiguar el ruido generado, asegurar el mayor rendimiento del motor, reducir la temperatura y contaminación generada por los gases expulsados.

Está constituido generalmente por un colector de escape que recoge los gases en salida de los cilindros prolongado por un dispositivo de evacuación. Un mismo motor puede disponer de varios tubos de escape.

El tubo de escape sirve, en particular, para reducir el ruido y la contaminación.

- A través de un sistema que permite reducir el ruido: llamado silenciador.
- Mediante un sistema que permite reducir las emisiones contaminantes, por catálisis y por filtración, gracias al filtro de partículas y al catalizador.
Ver figura 19.

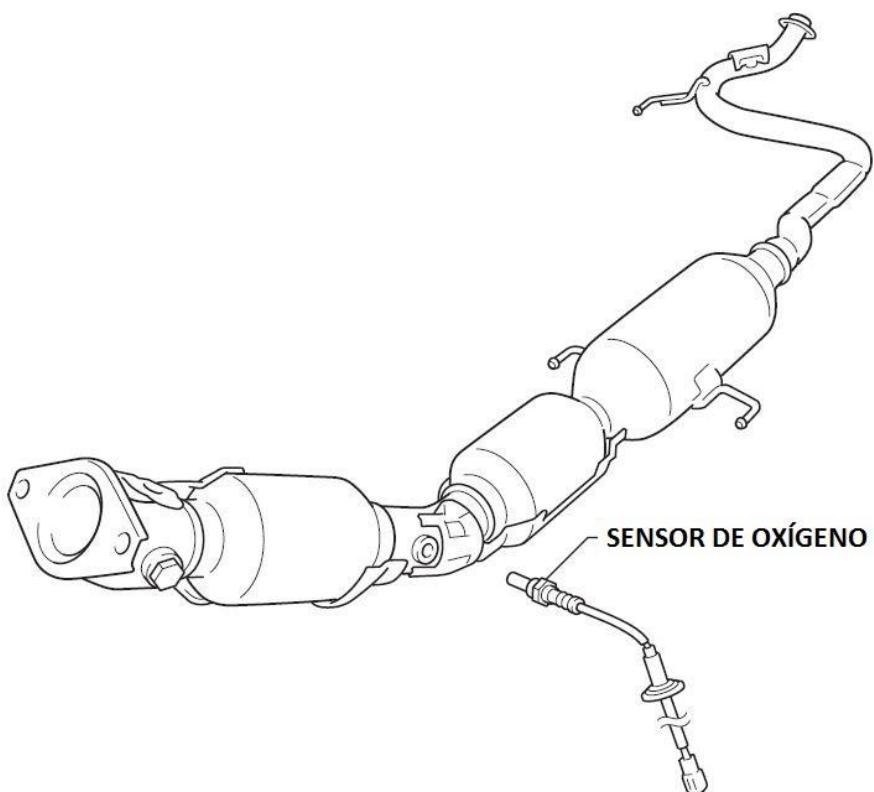
El tubo de escape participa en el funcionamiento del motor:

- Si es demasiado libre, el motor aumenta su potencia (el cilindro se vacía mejor después de cada explosión), pero se calienta aún más y consume más combustible.
- Si está demasiado obstruido, el motor denota falta de potencia.

- En los motores de dos tiempos, el tubo de distensión permite mejorar a la vez el vaciado del cilindro y la compresión.

Los motores con turbocompresor tienen generalmente todos sus escapes agrupados en uno, con el fin de tener que utilizar un único turbo. Los modelos de gama alta con gran número de cilindros pueden tener varios escapes independientes con tantos turbocompresores. En los motores a dos tiempos, el tubo de escape forma parte integral del funcionamiento del cilindro, lo que impone escapes enteramente separados.

Figura 19. **Sistema de escape con catalizador y sensor de oxígeno**



Fuente: Toyota Motor Company. *Emission Control*. p. 24.

1.3.12. Bujías

Es el dispositivo encargado de encender la mezcla aire-combustible que entra en los cilindros, a través de una chispa, en un motor de combustión interna de encendido provocado (Otto). Su correcto funcionamiento es crucial para el buen desarrollo del proceso de combustión y expansión del ciclo Otto, ya sea de dos o de cuatro tiempos y pertenece al sistema de encendido del motor.

Las bujías convierten la energía eléctrica generada por la bobina del encendido en un arco eléctrico, el cual a su vez permite que la mezcla de aire y combustible se expanda rápidamente generando trabajo mecánico que se transmite al pistón o émbolo rotatorio. Para ello hay que suministrar un voltaje suficientemente elevado a la bujía, por parte del sistema de encendido del motor para que se produzca la chispa, al menos de 5 000 V. Esta función de elevación del voltaje se hace por autoinducción en la bobina de alta tensión.

Figura 20. **Bujía**



Fuente: Toyota Motor Company. *Engine Mechanical*. p. 37.

1.3.13. Turbocompresor

El turbocompresor consiste en una turbina accionada por los gases de escape del motor de explosión, en cuyo eje se fija un compresor centrífugo que toma el aire a presión atmosférica después de pasar por el filtro de aire y luego

lo comprime para introducirlo en los cilindros a mayor presión. Los gases de escape inciden radialmente en la turbina, saliendo axialmente, después de ceder gran parte de su energía interna a la misma.

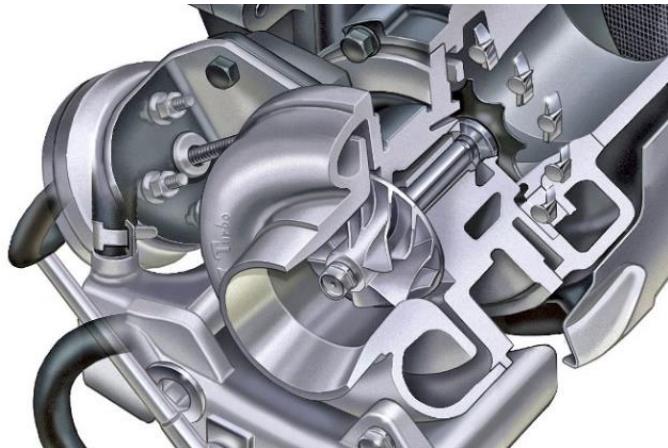
El aire entra al compresor axialmente, saliendo radialmente, con el efecto secundario negativo de un aumento de la temperatura más o menos considerable. Este efecto se contrarresta en gran medida con el *intercooler*.

Este aumento de la presión consigue introducir en el cilindro una mayor cantidad de oxígeno que la masa normal que el cilindro aspiraría a presión atmosférica, obteniéndose más par motor en cada carrera útil. Por lo tanto tendrá más potencia que un motor atmosférico de cilindrada equivalente, y con un incremento de consumo proporcional al aumento de masa de aire en el motor de gasolina. En los motores diésel la masa de aire no es proporcional al caudal de combustible, siempre entra aire en exceso al carecer de mariposa, por ello ese es en este tipo de motores de donde se ha encontrado su máxima aplicación.

En los motores diésel, por otra parte, las presiones alcanzadas al final de la carrera de compresión y sobre todo durante la carrera de trabajo son mucho mayores (40 a 55 bar) que en el motor de ciclo Otto (15 a 25 bar). Esta alta presión, necesaria para alcanzar la alta temperatura requerida para la autoignición del diésel, es el origen de que la fuerza de los gases de escape, a igual régimen, cilindrada unitaria y carga requerida al motor sea mucho mayor en el motor diésel que en el de gasolina.

Los turbocompresores más pequeños y de presión de soplado más baja ejercen una presión máxima de 0,25 bar, mientras que los más grandes alcanzan los 1,5 bar. Con estos motores de competición se llega a presiones entre 3 y 8 bar dependiendo de si el motor es gasolina o diésel.

Figura 21. **Turbocompresor**



Fuente: Compressor 3D. www.turbocoche.com. Consulta 03 de noviembre de 2014.

1.4. Desplazamiento

El desplazamiento del motor es la cantidad de aire que es capaz el pistón de desplazar dentro del cilindro. Esto no incluye el volumen de aire por encima del pistón donde se activa el encendido inicial.

Los cilindros en un motor de combustión interna no están nunca en sus volúmenes máximos al mismo tiempo. Sin embargo, sus posiciones se escalonan de modo que una potencia más continua se puede producir, en lugar de ráfagas de energía. El desplazamiento del motor es típicamente medido en litros, pero también puede ser expresado en centímetros cúbicos o en pulgadas cúbicas dependiendo del sistema de medida que se desea utilizar. Muchos motores de motocicletas y equipos de césped tienen un desplazamiento total de menos de un litro.

1.5. Relación de compresión motor ciclo Otto

Es la relación que existe entre el volumen que ocupa la mezcla de gasolina y aire que ha ingresado en el cilindro, esto en el tiempo de admisión cuando el pistón está en el PMI y el volumen en que ha quedado reducido al terminar el tiempo de compresión cuando el pistón está en el PMS. A esto se le llama relación de compresión estática. Por ejemplo si el volumen del cilindro se ha reducido de volumen del PMI al PMS ocho veces, se dice que hay una relación de compresión de 8:1, pero la compresión en verdad no empieza hasta que la válvula de admisión se cierra. Esto ocurre más tarde del PMI y el pistón habrá recorrido una distancia cuando esto suceda, la relación de compresión que se calcula con el recorrido del pistón desde el punto donde se cierra la válvula de admisión hasta el PMS, es la relación de compresión dinámica.

$$Rc = \frac{Vc + Vcc}{Vcc}$$

Donde:

Rc = relación de compresión

Vc = volumen del cilindro

Vcc = volumen de la cámara de combustión

Si la relación de compresión es demasiado alta, la mezcla de aire y combustible se sobrecalentará y se autoencenderá antes de que la bujía haga la chispa, lo cual podría dañar el motor. Las relaciones de compresión de 10:1 o de 11:1 para los motores de combustión a gasolina fueron comunes en los años 60, debido al alto octanaje del combustible que se quemaba uniformemente.

Otro inconveniente de las altas relaciones de compresión es que eleva las temperaturas de combustión y aumenta las emisiones de óxido de nitrógeno.

En la década de 1970, los fabricantes de automóviles redujeron la relación de compresión y las compañías fabricantes de hidrocarburos introdujeron al mercado gasolinas de menor octanaje para cumplir con los límites más estrictos de emisiones de gases tóxicos. Las relaciones de compresión de los motores actuales de gasolina están entre 8:1 y 12:1.

1.6. Relación de compresión motor ciclo Diésel

Los motores diésel tienen relaciones mayores de compresión para crear el calor para la ignición del combustible. Las relaciones de compresión, en este caso van aproximadamente entre 14:1 a 16:1 con inyección directa y entre 20:1 a 22:1 con antecámara.

En los motores de gasolina el aire y el combustible entran mezclados al cilindro debido a eso no se puede aumentar tanto la compresión porque la mezcla se calentaría demasiado y se autoencendería de forma descontrolada provocando daños al motor. En los motores diésel esto no ocurre porque el aire se comprime sin el combustible y cuando llega al punto máximo entonces se realiza la inyección, resultando en una explosión controlada.

1.7. Relación de combustión

La relación de combustión expresa la cantidad, en masa o en volumen, de aire aspirado por un motor de combustión para una cantidad unitaria de combustible. Dicha relación es función del combustible, del tipo de motor, de su regulación y de la carburación.

El valor ideal o teórico de tal relación es el correspondiente a la relación estequiométrica o proporción exacta entre las masas de la sustancia que forman parte de la reacción para conseguir una completa combinación química.

Cuando se trate de gasolinas comerciales la relación está comprometida entre 14,7 y 15,1 (es decir unos 15 kg de aire por cada kilogramo de combustible). Sin embargo, dicha condición se cumple solo en el caso de reacción en condiciones teóricas o ideales, sin tener en cuenta la mayor o menor rapidez con que se desarrolla efectivamente la combustión.

Es lógico que con una relación aire-combustible más baja que la estequiométrica (inferior a los 14,7) no todo el combustible podrá quemarse y una parte quedará sin quemar o parcialmente quemada, con formación de CO y HC. Hay que recordar que la combustión nunca es completa, independientemente de la relación aire-combustible, puesto que la reacción nunca se desarrolla en condiciones ideales.

Por regla general, en un motor de combustión interna de ciclo Otto, las variaciones de la relación aire-combustible se producen solo entre mezclas ricas. Como dato inactivo, puede asegurarse que a la máxima producción de potencia se obtienen valores entre 12 y 14, que pueden aumentar en determinadas condiciones de funcionamiento en regulación (a velocidad constante y con la mariposa entreabierta). También se obtiene crestas con valores bastante bajo en la gráfica de torque-consumo-rendimiento, durante las aceleraciones rápidas.

Los valores de la relación estequiométrica aire-combustible dependen de la composición química del carburante y, esencialmente, de la proporción de las cantidades, en peso, de carbono e hidrógeno contenidas en cada molécula.

2. IMPACTO AMBIENTAL POR LA QUEMA DE COMBUSTIBLES FÓSILES

2.1. Combustibles fósiles

La energía que se ve en el planeta, ya sea la que da lugar al movimiento del aire y de los océanos, a las nubes y a las lluvias, o a la que se manifiesta en forma de vida, procede de las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en el sol. Las plantas absorben la energía del sol a través de la fotosíntesis y los animales la toman, directa o indirectamente, de las plantas.

A lo largo de millones de años, una parte de la energía absorbida de este modo por los seres vivos fue quedando enterrada en forma de materia orgánica. También se fue transformando lentamente, mediante procesos físico-químicos, en diversos compuestos orgánicos sólidos como el carbón, petróleo y gas natural.

Estos compuestos, denominados combustibles fósiles, son finitos y no renovables, ya que necesitan de millones de años para formarse. Además no existen en la naturaleza otros compuestos de propiedades semejantes a las de estos. Y mucho menos en cuanto a facilidad de aprovechamiento y cantidad de energía almacenada se refiere.

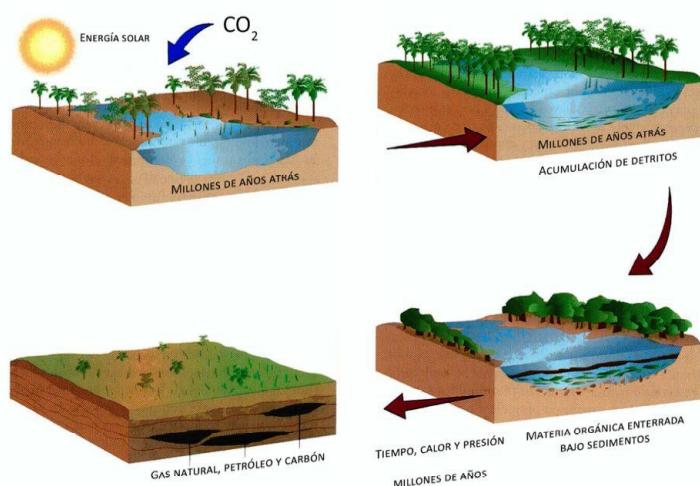
Los combustibles fósiles se formaron por la descomposición anaeróbica de restos de materia orgánica que se asentaron en el fondo de mares o lagos en grandes cantidades hace millones de años (véase figura 22). Con el tiempo

geológico, esta mezcla de materia orgánica y barro quedó enterrada bajo pesadas capas de sedimentos.

En estas condiciones de ausencia de aire, elevadas presiones y temperaturas y por la acción de bacterias anaeróbicas se modificó químicamente la materia orgánica. Esto dio lugar primero a un material ceroso denominado kerógeno y más tarde, por acción del calor mediante un proceso conocido como catagénesis, a hidrocarburos líquidos y gaseosos. Esta transformación no es rápida, por el contrario necesita millones de años para completarse.

Por otro lado, cuando estos procesos se daban en zonas terrestres, las plantas de estas zonas solían formar carbón y metano y, de hecho, muchas minas de carbón datan del periodo carbonífero. Las plantas terrestres también forman kerógeno de tipo III, una fuente de gas natural.

Figura 22. **Formación de combustibles fósiles**



Fuente: FRANCO, Daniel. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas*. p. 15.

2.1.1. Carbón

Se trata del primer combustible fósil usado por el hombre, y cuenta con abundantes reservas. Representa alrededor del 70 % de las reservas energéticas mundiales de combustibles fósiles conocidas actualmente. Además, se trata de la fuente energética más utilizada en la producción de electricidad a nivel mundial.

Es un combustible sólido, en forma de roca negra, con un alto contenido de carbono. Se obtiene principalmente de la explotación de yacimientos ricos en este material mediante minas, ya sea a cielo abierto o subterráneo.

En función de su antigüedad y poder calorífico el carbón mineral se puede clasificar en turba, lignito, hulla y antracita.

La turba es el carbón más reciente. Tiene un porcentaje alto de humedad de hasta el 90 %, un bajo poder calorífico, comúnmente inferior a 8 300 kJ/kg y poco carbono (menos de un 50 %). Presenta un pH que oscila entre 3,5 y 8,5. Se debe secar antes de su uso y se encuentra en zonas pantanosas. Comúnmente se emplea en calefacción.

El lignito es un carbón cuyo poder calorífico es menor a 29 300 kJ/kg, con una concentración de carbono que oscila entre 65 % y 75 % y mucha humedad (30 %). Se encuentra en minas de cielo abierto y por eso su uso suele ser el más rentable. Se emplea en centrales termoeléctricas.

La hulla tiene alto poder calorífico, de más de 29 500 kJ/kg y elevado porcentaje de carbono, entre 75 % y 85 %. Se emplea tanto en centrales termoeléctricas y fundiciones de metales.

La antracita es el carbón más antiguo, y de mayor calidad, pues tiene más de un 90 % hasta un 95 % de carbono. Arde con mucha facilidad y tiene un poder calorífico alto que supera los 33 500 kJ/kg.

Por otro lado, el carbón vegetal se obtiene mediante el uso de la madera, calentándola hasta temperaturas que oscilan entre 400 y 700 °C, en ausencia de aire. El poder calorífico del carbón vegetal oscila entre 29 000 y 35 000 kJ/kg, y es muy superior al de la madera, que oscila entre 12 000 y 21 000 kJ/kg.

2.1.2. Petróleo

Es un combustible fósil natural constituido por una mezcla de compuestos orgánicos, llamados hidrocarburos. Su poder calorífico oscila entre 37 600 y 46 000 kJ/kg.

En condiciones normales es un líquido bituminoso que puede presentar gran variación en diversos parámetros como color y viscosidad (desde amarillentos y poco viscosos como la gasolina hasta líquidos negros tan viscosos que apenas fluyen como el bunker C), densidad entre 0,75 g/ml y 0,95 g/ml. Muchas de las propiedades variantes del petróleo se deben a la diversidad de concentraciones de los hidrocarburos que componen la mezcla.

El petróleo se puede clasificar según los llamados crudos de referencia (Brent Blend, West Texas Intermediate, Tapis, Minas, Arabia Ligero, Aruba y otros) o según su gravedad API (American Petroleum Institute).

La gravedad API es una medida de densidad que describe el peso relativo del petróleo respecto al del agua. Es usado para comparar densidades de

fracciones extraídas de petróleo. Se mide con un instrumento llamado densímetro y no tiene unidades, aunque siempre se le coloca al número la denominación grado API.

El petróleo forma parte de todo tipo de plásticos, productos químicos, materiales de construcción de manera que está presente en casi todos los bienes de uso común utilizados actualmente. La lista sería interminable y abarca objetos tan variados como: componentes internos y cubiertas de aparatos electrónicos, cueros sintéticos, detergentes, productos de limpieza, cosméticos, pinturas, lubricantes, PVC, fertilizantes agrícolas, medicamentos, aislantes, asfaltos, fibras sintéticas para la ropa, muebles, botellas, pañales, ordenadores, cámaras fotográficas, baterías, gafas, lentillas, jabones, teléfonos móviles, pasta de dientes, bolígrafos, neumáticos y miles de otros más.

Los combustibles fósiles continúan siendo la fuente energética básica, pues no solo aportan el 80 % de la energía que se consume en el mundo, sino que también contribuyen al aprovechamiento de las demás fuentes energéticas conocidas. No debe sorprender, por tanto, que si el funcionamiento de la sociedad depende de tal medida de un recurso, cualquier variación en su precio afecte a todos los sectores económicos.

2.1.2.1. Refinado de petróleo

El petróleo crudo carece de utilidad. Sus componentes deben separarse en un proceso denominado refinado. Existen dos procedimientos para llevar a cabo este proceso de refinamiento. El *cracking* o craqueo catalítico y la destilación fraccionaria.

Además, se usa la destilación fraccionaria, en unas instalaciones llamadas torres de destilación o torre de fraccionamiento. Este procedimiento calienta el petróleo permitiendo la separación del crudo en distintas fracciones, por orden de volatilidad, sometiéndolo a unas temperaturas de unos 350 °C aproximadamente, y una posterior condensación.

Del refinado de petróleo se obtienen las siguientes fracciones, entre otras, también mostradas en la tabla IV. En la zona más alta de la torre se recogen los hidrocarburos más volátiles y ligeros y en la más baja los más pesados.

Tabla IV. **Fracciones de petróleo**

Gases: metano, etano, propano y butano
Nafta, ligoína o éter de petróleo
Gasolinás
Queroseno
Diésel (pesado y ligero)
<i>Fuel Oil</i>
Aceites lubricantes
Asfalto
Alquitrán

Fuente: XAUDARÓ, Cristian. *Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores*. p. 6.

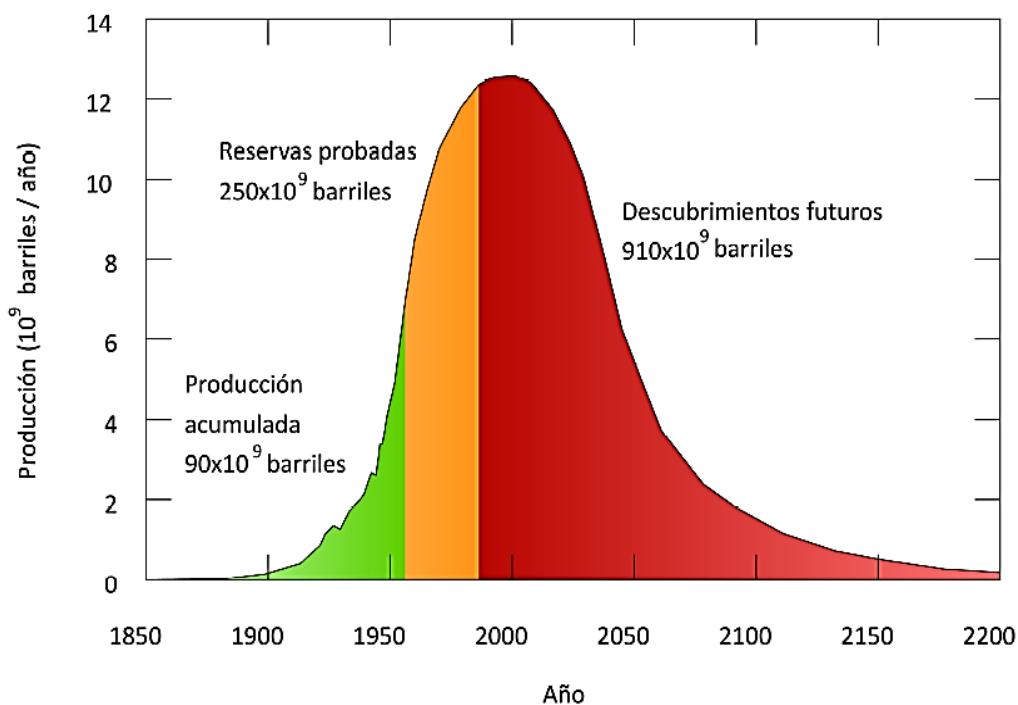
2.1.2.2. Reservas de petróleo pico Hubbert

En 1950, el científico estadounidense M. King Hubbert demostró, que la evolución que experimenta la explotación de cualquier pozo petrolero sigue una curva en forma de campana, llamada por ello curva de Hubbert.

Así pues, al iniciarse la explotación en el tramo ascendente de la curva, la producción de petróleo aumentará rápidamente, de forma que se puede extraer cada vez mayor cantidad con muy poco esfuerzo, además de ser de gran

calidad (ver figura 23). Con el paso del tiempo el aumento de la producción va perdiendo fuerza, hasta llegar al máximo, conocido como cenit del petróleo. A partir de ella la producción comienza un declive, disminuyendo la cantidad de petróleo obtenido, así como su calidad y pureza, hasta el agotamiento del pozo. Este punto se alcanza aproximadamente cuando se ha extraído la mitad del petróleo existente.

Figura 23. Curva de Hubbert



Fuente: FRANCO, Daniel. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas*. p. 27.

Si la evolución de la producción de cualquier pozo petrolífero muestra una curva en forma de campana, lógicamente, si se suman las producciones de varios de ellos, la curva que se obtiene tiene también una forma similar. Esto significa que la producción de cualquier yacimiento, país productor o la mundial en su conjunto también presentan una evolución en forma de campana.

Conociendo este hecho, y aplicando una serie de cálculos matemáticos, Hubbert dedujo en 1956, con notable precisión, que el cenit de la producción de petróleo de Estados Unidos, que entonces era el mayor productor de crudo del planeta, se alcanzaría aproximadamente en 1970. Y lo cierto es que el pico se alcanzó en 1971, año a partir del cual la producción ha seguido un progresivo descenso hasta el punto que, actualmente, Estados Unidos. Depende básicamente de la importación de crudo, ya que apenas hace uso de sus ahora escasas reservas. Para la producción mundial, Hubbert estimó que el cenit tendría lugar a finales del siglo XX o a principios de siglo XXI. Demostró también que si las reservas mundiales superasen en vez y media a las que él consideraba más probables, el cenit mundial se retrasaría sólo ocho años.

Numerosos estudios han venido verificando la validez de los resultados de Hubbert, y muestran que ya se ha consumido aproximadamente la mitad de las reservas iniciales, lo que indica que actualmente están en los años del cenit de la producción mundial de petróleo.

Muchos de los principales campos y países productores han entrado ya en declive. Cuando la producción de un país exportador cae por debajo de su consumo interno, pasa de ser exportador neto a importador neto, con lo que empieza a presionar sobre los mercados internacionales de crudo.

Los países que se mantienen en la parte ascendente de la curva de Hubbert se ven obligados a aumentar su producción para cubrir, no solo el incremento de la demanda internacional, sino también la disminución de las producciones de los que ya han pasado el cenit. Esto cada vez resulta más difícil y lo será más a medida que más campos y países productores vayan superando el cenit y entrando en el declive de sus producciones.

A esto hay que sumarle otro problema: la diversidad geográfica, ya que el petróleo se encuentra concentrado en un pequeño número de naciones agrupadas en la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo). Desde un punto de vista económico este es un gran inconveniente que se debería solucionar con la diversificación de las fuentes de energía, algo que el hidrógeno podría ayudar a conseguir.

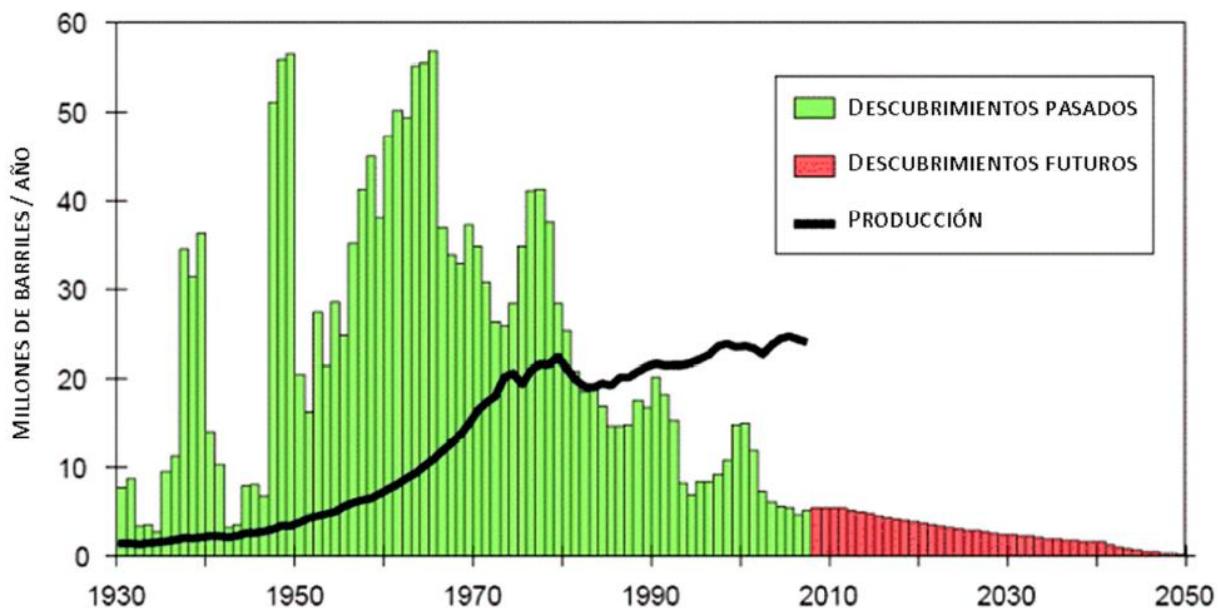
Así pues, aunque se estima que al ritmo de consumo actual queda petróleo para unos 40 años, el desafío más inminente al que se enfrenta la sociedad de principios del siglo XXI es el que supone entrar en declive de su producción. En el contexto de la fuerte dependencia existente hoy en día, y sin otras alternativas energéticas puedan reemplazar a corto plazo la gran cantidad de energía que proporciona.

Algo que vale la pena remarcar para hacerse una idea de la situación actual es que desde los años ochenta el consumo de petróleo supera a los descubrimientos, de forma que en la actualidad se ha alcanzado la alarmante proporción de que por cada barril que se descubre se consumen cuatro. Esto significa que casi todo el petróleo que se está consumiendo procede de los grandes yacimientos descubiertos hace varias décadas (ver figura 24).

El encarecimiento de la energía genera procesos inflacionarios que se extiendan a todos los sectores económicos y tiene impactos imprevisibles sobre las economías de todos los países, lo que puede poner en riesgo el equilibrio del sistema financiero internacional y desencadenar intensas crisis sociales. No obstante, esto también alzará a un puesto de privilegio a las energías renovables y a los combustibles ecológicos. Será entonces cuando existirá un consenso global para la transición del sistema energético actual a otro que sea sostenible.

La petrolera estadounidense Chevron–Texaco ha iniciado recientemente una campaña a través de la web www.willyoujoinus.com que empieza diciendo: *La energía será uno de los asuntos definitorios de este siglo. Una cosa está clara: la era del petróleo fácil se ha acabado. Lo que hagamos a partir de ahora determinará nuestro éxito en responder a las necesidades energéticas del mundo entero durante este siglo y los siguientes.*¹

Figura 24. Gráfica de producción vs descubrimientos actuales



Fuente: FRANCO, Daniel. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas*. p. 27.

2.1.3. Gas natural

Este, al igual que el petróleo se obtiene en los yacimientos. Consiste en una mezcla de gases que se encuentran almacenados en el interior de la tierra, ya sea aisladamente o con petróleo en el mismo yacimiento. Debido a su densidad menor que la del petróleo, en los depósitos se encuentra por encima de este.

1. Chevron. www.willyoujoinus.com. Consulta: 4 de diciembre de 2014.

Su origen es muy similar al del petróleo, a partir de la degradación del plancton y otros organismos comprimidos durante millones de años debajo de las capas de sedimentos. A lo largo de todos estos años, la presión y el calor generado por dichos sedimentos generaron la transformación de esos organismos en gas natural.

El gas se compone principalmente de metano (en un 70 %), mezclado con otros hidrocarburos ligeros, como etano, propano y butano. Su poder calorífico es de unos 46 000 kJ/m³

El proceso de extracción del gas es similar al del petróleo. Se usan torres perforadoras que llegan hasta los estados donde están ubicados los yacimientos para extraer el gas. Entonces se elimina el agua y alguna impureza que pueda tener y se transporta mediante gaseoductos a alta presión para su consumo directo.

O bien, si no es posible ese consumo directo se lleva a cabo un proceso de licuefacción. Este convierte el gas en líquido enfriándolo hasta temperaturas criogénicas de unos -160 °C. Y se transporta mediante buques cisternas de doble casco.

2.1.4. Efectos ambientales de los combustibles fósiles

Tanto la explotación como el consumo de combustibles fósiles acarrean unas consecuencias medioambientales muy significativas en todo el planeta que se hacen cada día más evidentes.

Además de los ya conocidos efectos de la combustión de hidrocarburos, tales como el de efecto invernadero, la lluvia acida, las cenizas u hollín y otros.

Además existen otros problemas a tener en cuenta como son los derrames de crudo o los de efecto que puede tener sobre la salud el aumento en la concentración atmosférica de determinados gases.

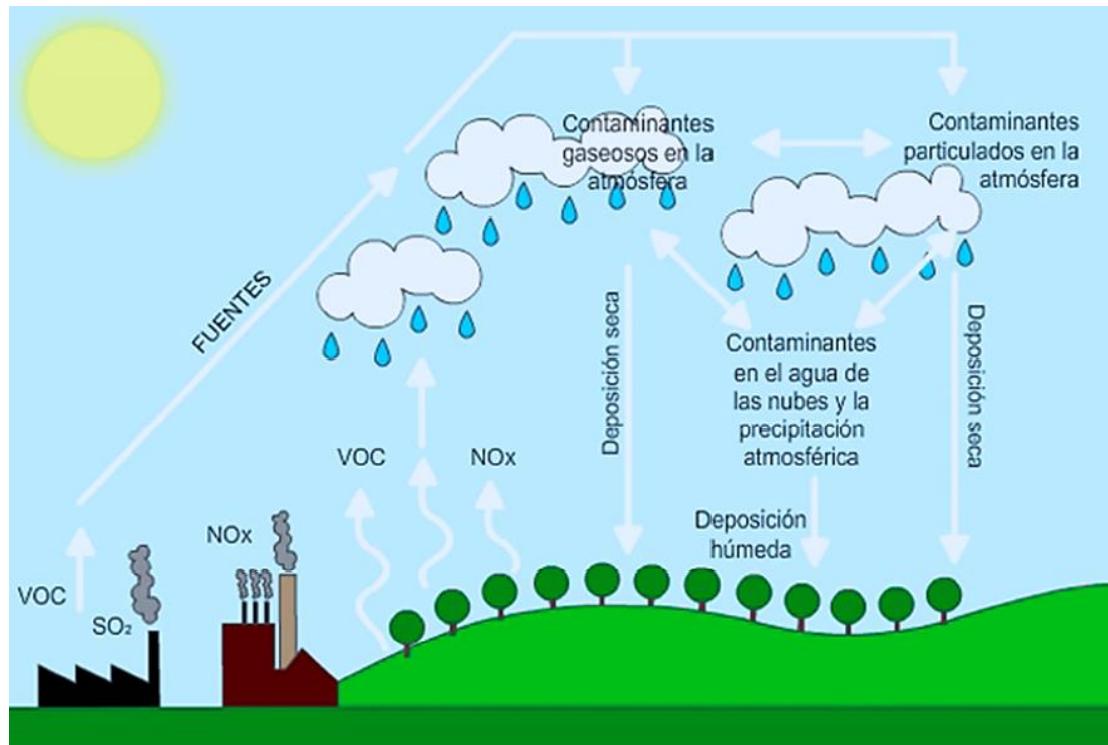
2.1.4.1. Lluvia ácida

Cuando los combustibles fósiles son quemados, el azufre, el nitrógeno y el carbono desprendidos se combinan con el oxígeno del aire para formar óxidos: dióxido de azufre (SO_2), monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de carbono (CO_2), respectivamente. Estos a su vez reaccionan químicamente con el vapor de agua de la atmósfera, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3) y ácido carbónico (H_2CO_3).

Estas sustancias químicas contaminantes pueden recorrer grandes distancias, siendo trasladados por los vientos cientos o miles de kilómetros antes de precipitar en forma de rocío, lluvia, llovizna, granizo, nieve, niebla, neblina o incluso unidas a partículas de polvo, constituyendo la lluvia ácida. Cuando la precipitación se produce provoca importantes deterioros en el medioambiente a causa de su nivel de pH de entre 5 y 3 por el exceso de estas sustancias, además de llegar a entrar en el ciclo del agua (ver figura 25).

La acidificación de las aguas de los lagos, ríos, y mares dificulta el desarrollo de la vida acuática en ellas, aumentando en gran medida la mortalidad de peces. De igual manera afecta directamente a la vegetación, produciendo daños en la zonas forestales y cultivos. Un efecto muy importante es que los protones (H^+) procedentes de la lluvia ácida arrastran ciertos iones del suelo (cationes de hierro, calcio, aluminio, plomo, zinc y otros) y, como consecuencia, se produce un empobrecimiento en ciertos nutrientes esenciales y el denominado estrés de las plantas, que las hace vulnerables.

Figura 25. Lluvia ácida



Fuente: FRANCO, Daniel. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas.* p. 17.

La lluvia acida, por su carácter corrosivo, corroe también las construcciones y las infraestructuras, pudiendo llegar a disolver, por ejemplo, el carbonato de calcio (CaCO_3), y afectar de esta forma a los monumentos y edificaciones construidas con mármol o caliza.

Se deben tomar medidas para reducir las emisiones de contaminantes precursores de este problema. Las más importantes serían las siguientes:

- Reducir el nivel máximo de azufre en diferentes combustible.
- Introducir tecnologías para el control de las emisiones de óxidos en las industrias y establecer límites legales.

- Impulsar el uso de energías alternativas en la industria y en el transporte.
- Agregar un compuesto alcalino en lagos y ríos para neutralizar el pH.

2.1.4.2. Calentamiento global

Actividades humanas comunes, como la quema de combustibles fósiles como el carbón, el gas natural, los productos derivados del petróleo y la tala inmoderada de los bosques, se han convertido en las principales causas de la emisión a la atmósfera de dióxido de carbono (CO_2). El gas más peligroso, no debido al ataque en sí a la atmósfera, sino en la gran cantidad de este gas que existe, en la generación del efecto invernadero.

Según los especialistas, la producción energética provoca además, a nivel mundial, el mayor consumo de combustibles fósiles; claro está con diferencias importantes entre unos países y otros.

Asimismo, las últimas mediciones reflejan que más del 90 % del dióxido de carbono presente en la atmósfera procede de Europa y Estados Unidos.

Desde 1850 existen registros mundiales de temperaturas, los primeros 13 años del siglo XXI se encuentran entre los años más cálidos, siendo los años 1998, 2005 y 2010 los más calurosos. En 2013 la temperatura media mundial en superficie era de 0,5 °C superior a la media registrada en el periodo de 1961 a 1990.

La temperatura promedio mundial en el aire cerca de la superficie de la tierra aumentó en 0,74 °C durante el periodo de 1906 a 2005. La temperatura se incrementó de forma importante a partir de 1950, así la tasa de calentamiento en los últimos 50 años fue casi el doble que en el periodo

conjunto de 100 años (0,13 °C por década frente a 0,07 °C por década). El efecto isla de calor de las ciudades es poco significativo representando solo el 0,002 °C del calentamiento por década. Las mediciones por satélite confirman el calentamiento pues establecen que las temperaturas de la zona inferior de la atmósfera se han incrementado entre 0,13 y 0,22 °C por década desde 1979.

Los cambios de temperatura no son homogéneos en todo el planeta. Desde 1979, las temperaturas sobre la superficie de la tierra han aumentado aproximadamente el doble de rápido que las temperaturas sobre la superficie de los océanos. Las temperaturas del océano aumentan más lentamente que las de la tierra, debido a la capacidad térmica más efectiva de los océanos y porque el mar pierde más calor por evaporación.

Del periodo anterior a los registros por instrumentos (1850), las temperaturas mundiales se estiman por métodos paleolíticos basados en mediciones de anillos arbóreos, en isótopos de hielo o en análisis químicos del crecimiento de los corales. Según estos métodos probablemente la temperatura media del hemisferio norte en la segunda mitad del siglo XX fue la más cálida en los últimos 1 300 años.

2.2. Gases de efecto invernadero por la quema de combustibles fósiles

El efecto invernadero es el proceso mediante el cual la absorción y emisión de radiación infrarroja por los gases presentes en la atmósfera, la calientan en el inferior del planeta y su superficie. Esto fue propuesto por Joseph Fourier en 1824 y fue investigado primero cuantitativamente por Svante Arrhenius en 1896.

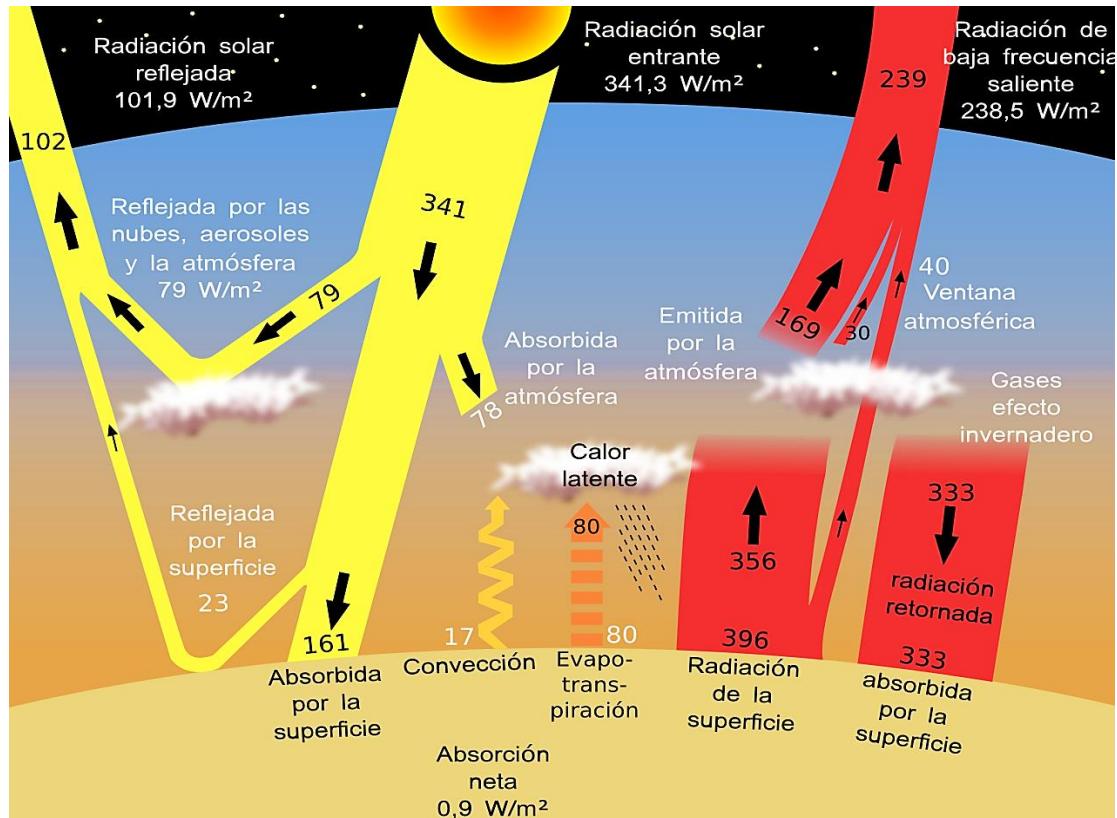
Los gases de efecto invernadero de origen natural tienen efecto de calentamiento medio de unos 33 °C. Los gases de efecto invernadero son el vapor de agua, que causa entre el 36 y 70 % del efecto invernadero; el dióxido de carbono (CO_2), causa entre el 9 y 26 %, el metano (CH_4), causa entre el 4 y 9%; y el ozono (O_3), es responsable entre 3 y 7 %. Las nubes también afectan el balance de radiación, pero están compuestos de agua líquida o hielo y así tienen diferentes efectos en la radiación del vapor de agua.

La actividad humana a partir de la Revolución Industrial, incrementando la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera, dando lugar a un aumento del forzante radioactivo de CO_2 , el metano, el ozono troposférico, los CFC y el óxido nitroso. Las concentraciones de CO_2 y metano han aumentado entre el 36 y 148 % respectivamente desde 1750. Estos niveles son mucho más altos que en cualquier momento durante los últimos 800 000 años, el periodo para el que existen datos fiables se ha extraído de muestras de hielo polar.

El IPCC SRES sugiere que para el 2100, la concentración atmosférica de CO_2 podría oscilar entre 541 y 970 ppm. Esto representa un aumento de 90 a 250 % por encima de la concentración en 1750. Las reservas de combustible fósiles son suficientes para llegar a estos niveles y mantener las emisiones después de 2100, si el carbón, las arenas bituminosas o el hidrato de metano con ampliamente explotados

En la figura 26 se observa el balance anual de energía de la tierra desarrollado por Trenberth, Fasullo y Kiehl de la NCR en 2008. Se basa en datos del periodo de marzo de 2000 a mayo de 2004. La superficie de la tierra recibe del sol 161 w/m^2 y del efecto invernadero de la atmósfera 333 w/m^2 , en total 494 w/m^2 , como la superficie de la tierra emite un total de 493 w/m^2 , supone una absorción neta de calor de 0,9 w/m^2 por año.

Figura 26. Efecto invernadero de la atmósfera



Fuente: Sun climate system. www.wikipedia.org. Consulta: 06 de noviembre de 2014.

2.2.1. Monóxido de carbono CO

Es un gas inodoro, incoloro y altamente tóxico. Puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados. Se produce por la combustión deficiente de sustancias como gas, gasolina, keroseno, carbón, petróleo, tabaco, o madera. Los vehículos detenidos con el motor encendido también lo despiden.

Este gas fue descubierto por el químico francés de Lassone en 1776, mientras calentaba óxido de zinc con coque. Erróneamente creyó que se trataba de hidrógeno porque generaba una llama de color azul. Más tarde en

1800, el químico inglés William Cruikshank comprobó que dicho compuesto contenía carbono y oxígeno. El envenenamiento por CO torna la sangre más rojiza y brillante en todos los tejidos.

2.2.2. Dióxido de carbono CO₂

También denominado gas carbónico y anhídrido carbónico. Es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Su fórmula molecular es CO₂. Es una molécula lineal y no polar, a pesar de tener enlaces polares. Esto se debe a que, dada la hibridación del carbono, la molécula posee una geometría lineal y simétrica. Su representación por estructura de Lewin es: O=C=O

Este gas se utiliza como agente extintor enfriando el fuego y dificultando el contacto de las llamas con el oxígeno del aire. En la industria alimentaria, se utiliza en bebidas carbonatadas para darles efervescencia. Y es uno de los principales contaminantes ambientales y del calentamiento global.

2.2.3. Óxido nitrógeno NOx

Es un gas incoloro y poco soluble en agua presente en pequeñas cantidades en los mamíferos. Está también extendido por el aire siendo producido en automóviles y plantas de producción de energía eléctrica. Se le considera un agente tóxico.

Es una molécula altamente inestable en el aire ya que se oxida rápidamente en presencia de oxígeno convirtiéndose en dióxido de nitrógeno. Por esta razón se le considera también como un radical libre.

Las emisiones de óxido de nitrógeno son máximas cuando el motor funciona a par máximo, es decir, cuando la presión media efectiva del motor es máxima. Así pues, las formaciones de óxido de nitrógeno están muy afectadas por las presiones y temperaturas en las carreras de expansión y escape. Los óxidos de nitrógeno se disocian en oxígeno y nitrógeno desplazándose del equilibrio químico hacia estos compuestos.

Su efecto para con la radiación solar es doble. Mientras en la baja atmósfera contribuyen al calentamiento global, en la alta atmósfera lo hacen al oscurecimiento global.

2.2.4. Metano

Es el hidrocarburo alcano más sencillo, cuya fórmula química es CH₄. Es una sustancia no polar que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias. Es incoloro y apenas soluble en agua en su fase líquida. En la naturaleza se produce como producto final de la putrefacción anaeróbica de la plantas. Este proceso se puede aprovechar biogás.

El metano constituye hasta el 97 % del gas natural. En las minas de carbón se le llama grisú y es muy peligroso, ya que es fácilmente inflamable y explosivo.

El metano es un gas de efecto invernadero relativamente potente que podría contribuir al calentamiento global del planeta tierra, ya que tiene un potencial de calentamiento global de 23; pero su concentración es bajísima. Esto significa que en una media de tiempo de 100 años cada kilogramo de metano calienta la tierra 25 veces más que la misma masa de dióxido de carbono. Sin embargo hay aproximadamente 220 veces más dióxido de

carbono en la atmósfera de la tierra por lo que el metano contribuye de manera menos importante al efecto invernadero.

2.3. Propiedades termodinámicas de los gases

Los fluidos de trabajo en los motores de combustión interna alternativos se pueden tratar como gases ideales. Esto permite entonces plantear la ley general de los gases ideales.

$$pV = mR_gT$$

$$pV = m \frac{R_u}{Mg} T$$

$$pV = nR_uT$$

$$\frac{p}{\rho g} = R_g T$$

Donde (p) es la presión, (V) es el volumen y (m) es la masa del gas, (R_g) es la constante del gas, (T) es la temperatura, (R_u) es la constante universal de los gases (8,3143 J/mol –K), M es el peso molecular y (n) el número de moles del gas.

Energía interna: para un gas ideal, la energía interna es exclusivamente función de la temperatura en un estado de equilibrio determinado. Esta energía es la acumulada por los átomos y moléculas que constituyen un sistema; varía con la posición, velocidad, grado de agitación, fuerza entre partículas y otros.

Las propiedades macroscópicas del sistema son las que caracterizan su estado termodinámico y sus valores se modifican con cualquier cambio en la energía acumulada.

Si la composición en el sistema no varía, entonces la energía interna es solo función de la temperatura, es decir:

$$U = U(T)$$

Y la energía interna molar o específica es:

$$u = u(T)$$

Entalpia: al igual que la energía interna es una propiedad de un sistema y se obtiene al sumar la energía interna con el trabajo de expansión. Por definición la entalpia total (H) es:

$$H = U + pV$$

Y la entalpia molar o específica es:

$$h = u + pv$$

La función de Gibbs: es una propiedad extensiva de un gas, que se representa mediante el símbolo (G) y se obtiene al restar la entalpia con el producto entre la temperatura y la entropía total del sistema.

$$G = H - TS$$

Y la función de Gibbs molar específica:

$$g = h - Ts$$

Calores específicos: las capacidades térmicas específicas de los gases ideales C_v y C_p son generalmente funciones de la temperatura y la presión, de acuerdo al postulado de estado. Sin embargo, al reducir la presión de un gas real, el comportamiento del mismo se aproxima al de un gas ideal, y el efecto de la presión sobre las capacidades térmicas específicas se vuelve despreciable. Los calores específicos a volumen y presión constante de un gas ideal son por definición:

$$C_v = \frac{du}{dT}$$

$$C_p = \frac{dh}{dT}$$

2.4. Mezcla de gases ideales

Los fluidos de trabajo en los motores de combustión interna son mezclas de trabajo. La composición de una mezcla de gases ideales se puede expresar en términos de las siguientes propiedades de cada componente:

Presión parcial (p_i): es la presión que cada componente ejercería si únicamente él ocupara el volumen de la mezcla a la temperatura de la misma.

Partes por volumen (V_i/V): es la fracción de volumen de mezcla total que cada componente ocuparía si fuera separado de la mezcla, a la temperatura y presión de esta.

Fracción másica (x_i): es la masa componente m_i , dividida por la masa total de mezcla m .

Fracción molar (X_i): es el número de moles de cada componente n_i , dividido por el número total de moles de mezcla n .

De la ecuación de los gases ideales se deduce que:

$$\frac{P_i}{p} = \frac{V_i}{V} = X_i \frac{M}{M_i} = x_i$$

2.5. Composición del aire y los combustibles

La composición del aire es esencial para el funcionamiento de los motores de combustión interna. Sin una buena mezcla de aire-combustible el motor puede presentar fallas y pérdida considerable de su desempeño.

2.5.1. Aire

En los motores usualmente se quema el combustible con aire. El aire seco es una mezcla que tiene una composición representativa por volumen de 20,95 % de oxígeno, 78,09 % de nitrógeno, 0,93 % de argón, y algunas trazas de CO₂, neón, helio, metano, y otros. En la tabla V se muestran los principales constituyentes del aire seco.

Tabla V. Principales constituyentes del aire seco

Gas	ppm por volumen	Peso molecular	Fracción molar	Relación molar
O ₂	209 000	31,998	0,209	1
N ₂	780 900	28,012	0,790	3,773
CO ₂	300	44,009	-----	-----
Aire	1 000 000	28,962	-----	4,773

Fuente: AGUDELO, John. Motores Térmicos. p. 69.

En la combustión el O₂ es realmente el componente reactivo del aire. Para cada mol de O₂ en el aire hay 3,773 moles de N₂. Este valor se obtiene dividiendo 0,790 entre 0,209. La densidad del aire se puede calcular mediante la ecuación.

$$\rho = \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{3,483 * p[kPa]}{T[K]}$$

2.5.2. Combustibles

La mayoría de los combustibles comúnmente usados en los motores de combustión interna son mezclas de muchos hidrocarburos que se obtienen mediante la refinación del crudo de petróleo.

Estos combustibles son predominantemente carbono e hidrógeno (generalmente el 86 % de C y el 14 % de H₂ en masa), aunque algunos hidrocarburos llegan a tener hasta el 1% en masa de azufre. Otros combustibles de interés son los alcoholes, combustibles gaseosos (GNG y GLP), compuestos simples de hidrocarburos (metano, propano, isoctano, hidrógeno) que comúnmente se emplean en la investigación de motores. Las propiedades de los combustibles más comunes en los en los motores de combustión interna se resumen en la siguiente tabla.

Tabla VI. **Entalpia de formación y pesos moleculares**

Combustible	Fórmula	M(g/mol)	Estado a 25 °C y 1 bar	Δh_f MJ/kmol
Oxígeno	O ₂	32	Gas	0
Nitrógeno	N ₂	28,01	Gas	0
Carbón	C	12,01	Sólido	0
Monóxido de carbono	CO	28,01	Gas	-110,50

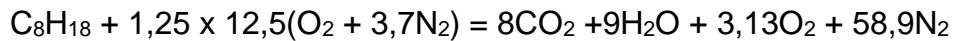
Continuación de la tabla VI.

Hidrógeno	H ₂	2,02	Gas	0
Agua	H ₂ O	18,02	Líquida	-285,80
Metano	CH ₄	16,04	Gas	-74,90
Propano	C ₃ H ₈	44,10	Gas	-103,8
Isooctano	C ₈ H ₁₈	114,23	Gas	-224,10
Cetano	C ₁₆ H ₃₄	226,44	Líquido	-454,5
Alcohol metílico	CH ₃ OH	32,04	Líquido	-238,60
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH	46,07	Líquido	-277

Fuente: AGUDELO, John. *Motores Térmicos*. p. 71.

2.6. Combustión estequiométrica

En una combustión completa ideal, los únicos productos de la combustión son CO₂ y agua. En algunas situaciones se puede llegar a quemar más o menos aire del requerido estequiométricamente así, para una combustión, es decir, con exceso de aire suele aparecer el oxígeno en los productos de combustión. Por ejemplo, para la combustión del isoctano con un 25 % de exceso de aire, es decir 1,25 veces más del aire requerido estequiométricamente se tendría:



Con menos aire del requerido estequiométricamente, es decir, una combustión rica en combustible, no habría suficiente oxígeno para oxidar completamente el C y H del combustible a CO₂ y H₂O. Bajo esta condición los productos no se pueden determinar con un balance elemental únicamente. Aquí es necesario realizar algunas hipótesis adicionales sobre la composición química de los productos.

Debido entonces, a que la composición de los productos de la combustión es diferente para mezclas pobres y ricas, además la relación aire–combustible depende de la composición del combustible. Se considera entonces que es un parámetro más informativo la relación combustible–aire relativo, que se define como la relación entre la relación combustible–aire del funcionamiento del motor y la relación combustible–aire estequiométrica.

$$Fr = \frac{\left[\frac{F}{A}\right]abs}{\left[\frac{F}{A}\right]est} = \frac{Fabs}{Fest}$$

Aquí se puede observar que el inverso de la relación aire–combustible relativo (Fr) es lo que se denomina Lambda (λ) o relación aire–combustible relativa estequiométrica:

$$\lambda = Fr^{-1} = \frac{\left[\frac{A}{F}\right]abs}{\left[\frac{A}{F}\right]est}$$

Se habla de mezclas pobres o ricas en combustible:

Para mezclas pobres: $Fr < 1$ y $\lambda > 1$

Para mezclas ricas: $Fr > 1$ y $\lambda < 1$

Para mezclas estequiométricas: $Fr = 1$ y $\lambda = 1$

2.6.1. Mezcla ideal

Para que la mezcla sea ideal el factor lambda “ λ ” debe ser igual a uno, esto quiere decir que el motor estará quemando 1 kg de combustible por cada 14,7 kg de aire. Se recuerda que el factor lambda designa la proporción aire-combustible en forma de mezcla que entra al cilindro de un motor de combustión interna, comparada con la proporción estequiométrica de la mezcla ideal.

Solo con la proporción de mezcla ideal se garantiza la combustión completa de los hidrocarburos. Entonces el catalizador puede convertir prácticamente la totalidad de los gases de escape nocivos en gases inocuos para el medio ambiente.

2.6.2. Mezcla pobre

En los motores de combustión interna cuando su valor λ es mayor de 1 se dicen que funcionan con una mezcla pobre, es decir que la proporción de aire-combustible en peso es mayor que la estequiométrica de 14,7 a 1. Un valor moderado de factor lambda como por ejemplo 1,05 permite unas óptimas condiciones de economía de combustible. Sin embargo son incompatibles con el catalizador. Si se tiene un menor consumo específico, también se tendrá una menor emisión de contaminantes de monóxido de carbono.

Según el valor mayor o menor del factor lambda dentro de los márgenes de funcionamiento (hasta 1,2), se considera un menor par motor y por lo tanto una menor potencia, pero una mayor emisión de óxidos de nitrógeno, probablemente un autoencendido del combustible y un sobrecalentamiento por la lenta combustión.

2.6.3. Mezcla rica

Los motores de combustión interna que funcionan con mezcla rica cuando el factor lambda es menor a 1, es decir que la proporción de aire-combustible es peso es menor que la estequiométrica de 14,7:1. Un valor moderado de factor lambda sería como ejemplo 0,95 permite una óptimas condiciones de par motor y por lo tanto mayor potencia. Esto es al contrario de la mezcla pobre, sin embargo estos valores también son incompatibles con el uso del catalizador y se producen gases nocivos para la atmósfera.

2.7. Energía calorífica de los combustibles

El calor representa la cantidad de energía que un cuerpo transfiere a otro como consecuencia de una diferencia de temperatura entre ambos. El tipo de energía que se pone en juego en los fenómenos caloríficos se denomina energía térmica. El carácter energético del calor lleva consigo la posibilidad de transformarlo en trabajo mecánico.

La cantidad de calor tomada o cedida por un cuerpo es directamente proporcional a su masa y al aumento (o disminución) de temperatura que experimenta. La expresión matemática de esta relación es la ecuación calorimétrica:

$$Q = c * m * (T_f - T_i)$$

Donde (Q) representa el calor cedido o absorbido, (m) es la masa del cuerpo, (T_f) y (T_i) la diferencia de temperaturas respectivamente. La letra (c) representa la constante de proporcionalidad correspondiente y su valor es

característico del tipo de sustancia que constituye el cuerpo en cuestión. Dicha constante se denomina calor específico.

El calor específico de una sustancia equivale, por tanto, a una cantidad de calor por unidad de masa y de temperatura; o en otros términos, es el calor que debe suministrarse a la unidad de masa de una sustancia dada para elevar su temperatura un grado.

Tabla VII. **Poderes caloríficos de algunos combustibles**

Tipo de combustible	Poder calorífico en kJ/kg
Gas natural	53 600
Acetileno	48 550
Propano	46 000
Gasolina	46 000
Butano	46 000
Diésel	42 700
<i>Fuel oil</i>	40 200
Alcohol	28 200

Fuente: Combustible. www.wikipedia.org. Consultado: 08 de noviembre de 2014.

2.8. Enfriamiento del motor

El calor cedido por la oxidación del combustible dentro del motor de combustión interna hacia las paredes del cilindro y arrastrado posteriormente por el agua de refrigeración, puede ser determinado realizando algunas de estas hipótesis:

- El calor cedido por radiación, conducción y convección durante el periodo de combustión.
- El calor cedido por el periodo de expansión.

- El calor cedido durante el periodo de escape.
- El calor generado por la fricción del cilindro y los anillos del pistón.

Enfriamiento del motor durante la combustión: el período de combustión comparado con el tiempo de expansión es relativamente corto, pero durante este periodo la temperatura que lo regula y la densidad en la cámara son muy altos entre 2 100 y 2 300 °C en el caso de los combustibles líquidos más volátiles, tales como los derivados del petróleo, el benzol, y otros. Es también un periodo durante el cual los gases, dentro de la cámara de combustión, están en un estado de violenta agitación, así que el calor es transferido muy rápidamente por convección.

Ahora, si por cualquier medio la pérdida de calor a las paredes del cilindro durante este período es suprimida, tal calor podría ser convertido en potencia indicada a una eficiencia que corresponde a la eficiencia de la expansión sola (es decir, excluyendo el trabajo negativo hecho durante la compresión). Esto en un motor con una relación de compresión de 5:1 tendría una recuperación de cerca de 40 %. El 60 % restante del calor, así recuperado, sería rechazado al escape después de la expansión.

Enfriamiento del motor durante la expansión: la pérdida de calor durante el periodo de expansión puede o no ser seria, dependiendo de la parte del soplado de expansión en la cual se pierde. Si la pérdida de calor ocurre al comienzo del período de expansión, es casi tan serio como la pérdida durante el período de combustión, porque si estas pérdidas fueran eliminadas, unos las podrían utilizar para acercar más la eficiencia del ciclo a la eficiencia teórica; mientras que el calor perdido durante el final del periodo de expansión es de poca importancia, ya que si fuera eliminada la pérdida, el calor daría muy poco

trabajo útil durante el resto del periodo, y de todas formas casi todo este calor sería rechazado en los gases de escape.

Promediando las pérdidas de calor durante la expansión, probablemente solo cerca del 20 % podría haber sido convertido en trabajo útil y el restante 80 % habría sido rechazado por los gases de escape.

Enfriamiento del motor durante el escape: aunque durante el tiempo de escape la temperatura de los gases es mucho menor, todavía se tiene calor y se transmite al agua de enfriamiento con gran rapidez durante este período. Además del flujo normal de calor a las paredes del cilindro, los gases calientes están pasando por una alta velocidad a través de la válvula de escape y a través de un pequeño tramo e tubería de escape el cual está siempre incorporado en la camisa del cilindro y enfriado por el agua circulante. En consecuencia, del calor total transportado por el agua de enfriamiento, por lo menos la mitad y a veces más de la mitad se ceden durante el periodo de escape.

Las pruebas realizadas por medio de motores de ensayo, bajo condiciones lo más aproximadas posible a las condiciones normales de rodamiento, muestran que el calor generado por la fricción del pistón usualmente está en rangos entre el 1 % y el 1,5 % del poder calorífico inferior total del combustible. La mayor parte de este calor por fricción encontrará su camino a través de las paredes del cilindro.

2.9. Importancia de la transferencia de calor

La temperatura máxima de los gases quemados al interior del cilindro de un motor de combustión interna es aproximadamente de 2 400 °C. Las temperaturas máximas que resisten los metales que se emplean para fabricar los motores son mucho más bajas, por esta razón es necesario refrigerar la culata, cilindro (s) y pistón (es). Todas estas condiciones llevan a que los flujos de calor a las paredes de la cámara alcancen valores de hasta 10 MW/m² durante el periodo de combustión. Sin embargo, en otras partes del ciclo, el flujo de calor llega a ser prácticamente cero. El flujo varía sustancialmente con la ubicación. Aquellas regiones de la cámara que están en contacto con el movimiento rápido de los gases quemados a elevada temperatura son las que están sometidas a los flujos más altos.

En estas regiones se deben mantener las temperaturas lo suficientemente bajas para lograr evitar la fatiga térmica (inferiores a 400 °C para fundiciones grises y 300 °C para aleaciones de aluminio). Las paredes del cilindro del lago del gas deberían mantenerse a una temperatura inferior a 180 °C, para evitar el deterioro de la película de aceite de lubricación. La bujía y las válvulas, especialmente la de escape, tiene que refrigerarse para evitar problemas de detonación de la mezcla final y de preencendido.

La transferencia de calor afecta el funcionamiento, el rendimiento y las emisiones del motor. Para una masa de combustible dada dentro del cilindro se cumple que a mayor transferencia de calor hacia las paredes de la cámara, serán más bajas las presiones y temperaturas medias de los gases de combustión, lo que reduce el trabajo por ciclo transmitido al pistón.

2.10. Cálculos de transferencia de calor en el motor

La transferencia de calor dentro del cilindro es un fenómeno tan desconocido y difícil de predecir, quizás como el mismo proceso de combustión. No obstante, a pesar de su importancia, los errores en su modelado no son tan significativos. El transfiere desde el gas hasta las paredes interiores del cilindro por convección forzada y por radiación de las partículas luminosas de carbón y de los gases. Una vez en las paredes del cilindro, el calor se transfiere por conducción a través de estas hasta el refrigerante (agua o aire) medio en el que se transmite por convección forzada.

La expresión que se emplea para calcular el calor transmitido es la siguiente:

$$Q = h_g * [A_p * (T_g - T_p) + A_{cul} * (T_g - T_{cul}) + A_{camisa} * (T_g - T_{camisa})] + \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_{pared,g}^4)$$

Donde:

Q = tasa de transferencia de calor (W/s)

h_g = coeficiente de transferencia de calor (W/m²*K*s)

A_p = área del pistón (m²)

A_{cul} = área de la culata (m²)

A_{camisa} = área de la camisa (m²)

T_g = temperatura instantánea de los gases dentro del cilindro (K)

$T_{p,cul,camisa}$ = temperatura pistón, culata, y camisa respectivamente

ε = emisividad

σ = constante de Stephan–Boltzman ($56,7 \times 10^{-12}$ kW/m²K⁴)

2.11. Cálculos de enfriamiento del motor

Estos cálculos se emplean con el fin de diseñar el circuito de refrigeración del motor. Permiten estimar el calor convectivo cedido al refrigerante.

Mediante la ecuación:

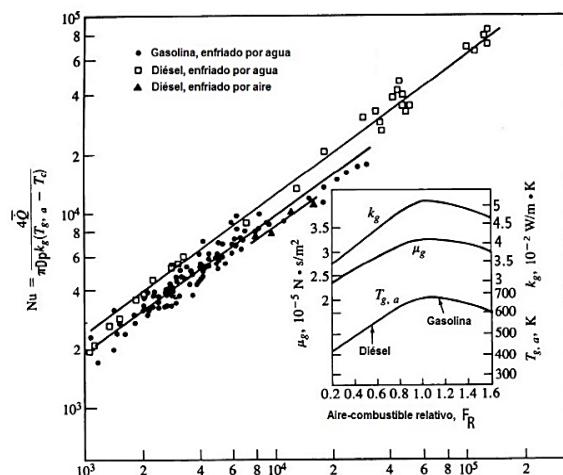
$$Q = h_r (T_g - T_r) A_p$$

Donde (Q_r) es el calor que tiene que evacuar el radiador, (h_r) es el coeficiente de película promedio, del lado del refrigerante y se calcula según Taylor y Toong de la siguiente manera:

$$Nu = 10,4 \text{ Re}^{0,75}$$

Los valores de las propiedades de transporte para la ecuación de *Taylor* y *Toong* se obtienen con la siguiente gráfica:

Figura 27. **Transferencia de calor en el motor**



Fuente: AGUDELO, John. Motores Térmicos. p. 15.

Donde:

T_{ga} = temperatura media del gas

μ_g = viscosidad absoluta del gas

K_g = conductividad térmica del gas

En la gráfica anterior se observan tres líneas según el tipo de motor y su sistema de refrigeración. La línea del motor diésel refrigerado por agua es cerca de un 25 % más alta que la línea del motor a gasolina. La línea del motor refrigerado por aire es más baja que la de los que son refrigerados por agua, probablemente debido a que las temperaturas superficiales son más elevadas.

- Balance de energía en el motor: partiendo de que la energía suministrada en el combustible se compone de la potencia efectiva N_e más la suma de la tasa de calor que se lleva el refrigerante Q_{ref} , el aceite Q_{aceite} , la entalpia sensible de los gases que no se queman $H_{e,inc}$ y la de los quemados h_e , se tiene:

$$\dot{m}_f H_c = P_e + Q_r + Q_{aceite} + \dot{H}_{e,inc} + \dot{m}_f h_c$$

En la siguiente tabla se muestra la influencia de los parámetros antes mencionados en el comportamiento global del motor, como pérdidas que se le restan al poder calorífico inferior del combustible.

Tabla VIII. Pérdidas en el motor en función del poder calorífico inferior

Motor	N_e	Q_{ref}	Q_{aceite}	$H_{e,inc}$	Mh_e
Gasolina	25 - 28	17 - 26	3 - 10	2 - 5	34 – 45
Diésel	34 - 38	16 - 35	2 - 6	1 - 2	22 - 35

Fuente: AGUDELO, John. Motores Térmicos. p. 152.

El balance de energía dentro de un motor es muy complicado. La potencia indicada es la suma de la efectiva y la de la fricción. Una parte considerable de la potencia de fricción se disipa en la zona de los anillos y la camisa y se transfiere como energía térmica al refrigerante. El resto de la potencia de fricción se disipa en los rodamientos, el mecanismo de válvulas, y en los auxiliares; y se transfiere como energía térmica al aceite o al entorno ($Q_{perdido}$).

2.12. Perdidas mecánicas y lubricación del motor

A los ingenieros lo que realmente debe interesarles es la proporción de trabajo útil obtenible en el cigüeñal y en realidad no se gana nada consumiendo por fricción interna o por bombeo de aire lo que debe mejorarse es el rendimiento térmico indicado, ya que generalmente al tratar de aumentar esta, aumentan los anteriores.

Tomada en su extensión la fricción interna mecánica de un motor es una función de la máxima presión, puesto que esto, en gran parte, determina tanto el área de las partes deslizantes como el peso de las partes móviles. También determina la fricción de los anillos del pistón, o por lo menos del anillo superior del pistón contra las paredes del cilindro, pues para funcionar, es esencial que este anillo tenga detrás de sí la presión del gas.

Desde el punto de vista mecánico, se necesita entonces la máxima presión media efectiva posible, combinada con la menor relación posible entre la presión máxima y la presión media efectiva.

A medida que se aumenta la velocidad de rotación del motor, se gana en rendimiento indicado debido a la reducción de las pérdidas de calor, pero igualmente, a medida que se incrementa también la fricción resultantes de las

fuerzas dinámicas debidas a la inercia del pistón, y otros. Las fuerzas dinámicas aumentan con el cuadrado de la velocidad de rotación, como también la resistencia viscosa del lubricante.

No todo el trabajo transferido por los gases al interior del cilindro-trabajo indicado se convierte en trabajo disponible en el eje. Una fracción de este se transforma en fricción y se le denomina trabajo de fricción.

El trabajo o potencia de fricción es una fracción considerable del trabajo indicado, llegando a ser cerca del 10 % a plena carga y del 100 % a ralentí. Esto es punto de funcionamiento en el cual toda la energía generada en el cilindro se emplea en vencer las pérdidas de fricción. Gran parte de las pérdidas de fricción se disipan en forma de calor y son arrastradas por el refrigerante y por el aceite.

El trabajo de fricción, definido como la diferencia entre el trabajo durante la compresión y expansión y el trabajo en el eje del motor, se consume de la siguiente manera:

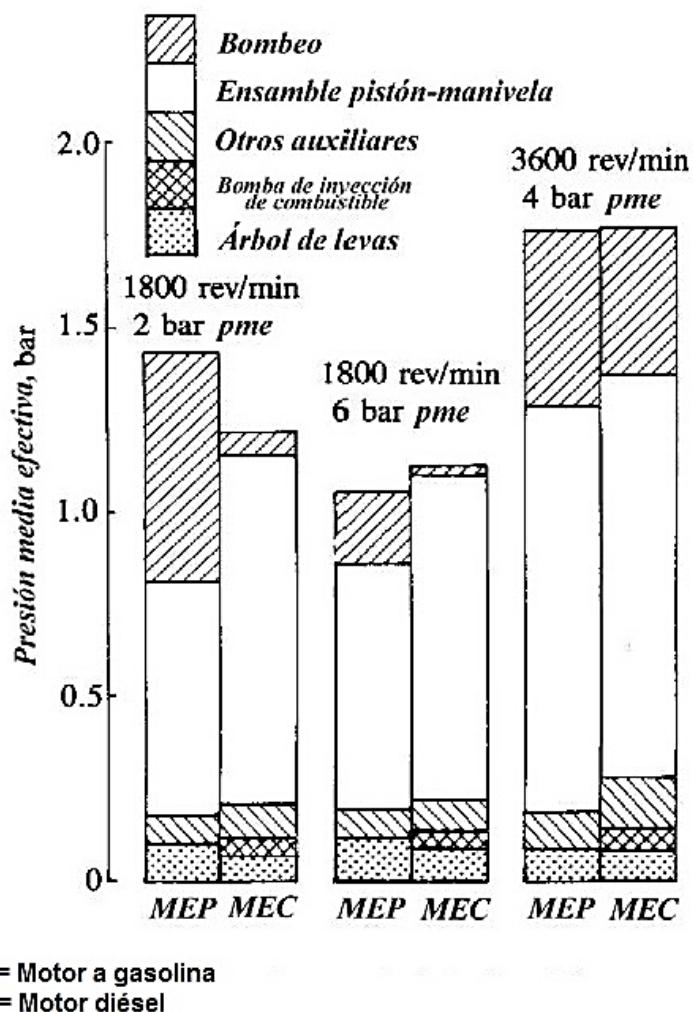
- En arrastrar mezcla fresca durante la carrera de admisión y en sacar los gases quemados desde el cilindro durante la carrera de escape. Este usualmente se llama trabajo de bombeo (durante la renovación de la carga).
- Para vencer el movimiento relativo de las partes móviles del motor. Incluye fricción entre segmentos (anillos) y camisa, cigüeñal, rodamientos del árbol de levas, mecanismos de las válvulas, piñones, poleas o bandas.
- Para mover los accesorios del motor. Ventilador, bomba de agua, bomba de aceite, bomba de combustible, alternador, aire acondicionado y otros.

El trabajo total de fricción: es la suma de los tres componentes anteriores:

$$W_t = W_b + W_r + W_a$$

En la siguiente gráfica se muestra el aporte de los componentes de fricción antes mencionados en presión media efectiva de fricción total.

Figura 28. Comparación entre las distintas formas de fricción del motor



Fuente: AGUDELO, John. Motores Térmicos. p. 167.

2.13. Pérdidas por fricción

En muchas ocasiones es importante predecir mediante un modelo de cálculo matemático el funcionamiento de un motor, especialmente para mirar tendencias de comportamiento y para evitar grandes costos al momento de realizar ensayos. Un método corriente consiste en obtener, mediante un modelo de combustión del motor, los parámetros indicados. Debido a que el término que realmente interesa es la potencia del motor en el eje, es necesario entonces restarle a los valores indicados la potencia requerida para vencer las pérdidas de fricción.

Una de las referencias más conocidas para el cálculo de la fricción en los motores diésel turboalimentados es la de S.K. Chen y P.F. Flynn. Sus investigaciones las realizaron en un motor experimental diésel monocilíndrico capaz de soportar presiones en el cilindro de 200 bar con presiones medias indicadas de hasta 18 bar a 3 200 rpm. Los ensayos fueron realizados en dos variantes de la cuales la ER-2 incluía las pérdidas de auxiliares.

$$Pmf = 0,318 + 0,005 * p_{max} + 0,164 * C_m \text{ (ER-2)}$$

2.14. Sistemas de lubricación

Los lubricantes se interponen entre las dos superficies en movimiento. De esta manera, forman una película separadora que evita el contacto directo entre ellas y el consiguiente desgaste.

Es conveniente señalar que el lubricante no elimina totalmente el rozamiento, aunque si lo disminuye notablemente. Esta disminución del rozamiento es la definición de lubricación.

El rozamiento por contacto directo entre las superficies es sustituido por otro rozamiento interno mucho menor, entre las moléculas del lubricante. Este rozamiento interno es lo que se llama viscosidad.

El lubricante y el sistema de lubricación desempeñan las siguientes funciones principales:

- Reducir las pérdidas de fricción y asegurar el máximo rendimiento mecánico del motor.
- Proteger el motor contra el desgaste.
- Contribuir a la refrigeración del pistón y de aquellas partes por las cuales se disipa el trabajo de fricción.
- Remover impurezas de las zonas lubricadas.
- Mantener las fugas de gas y de aceite (especialmente en la región de los anillos) a un nivel mínimo aceptable.
- Ahorrar energía, evitando que se pierda en rozamientos inútiles que se oponen al movimiento, y generar calor.
 - Refrigeración: el aceite contribuye a mantener el equilibrio térmico de la máquina, disipando el calor que se produce en la misma como consecuencia de la fricción de los mecanismos y la combustión. Esta sería la segunda función más importante después de la lubricación. En general se podría decir que el aceite elimina entre el 10 y 25 % del calor total generado en el motor.
 - Eliminación de impurezas: en las máquinas y equipos lubricados se producen impurezas de todo tipo. Algunas por el propio proceso de funcionamiento como la combustión de los motores, también partículas procedentes de desgaste o corrosión y

contaminantes externos. El aceite lubricante debe eliminar por circulación estas impurezas, siendo capaz de mantenerlas en suspensión en su seno y llevarlas hasta los elementos filtrantes apropiados. Se podría decir que el aceite lubricante se ensucia para mantener limpio el motor.

- Anticorrosivo y antidesgaste: el aceite lubricante debe tener la propiedad anticorrosiva y reductora de la fricción y el desgaste natural. este puede incrementarse por aditivos para preservar de la corrosión diversos tipos de metales y aleaciones que conforman las piezas dentro del motor de combustión.
- Sellante: el aceite lubricante tiene la misión de hacer estancas aquellas zonas en donde puedan existir fugas de otros líquido o gases que contaminan el aceite y reducen el rendimiento del motor. La cámara de combustión en los motores de combustión interna y los émbolos en los amortiguadores hidráulicos son dos ejemplos donde un lubricante debe cumplir esta función.

2.14.1. Propiedades generales de los lubricantes

Los lubricantes se componen de aceites base y una serie de aditivos modificadores de las propiedades de estos aceites. Los aceites base pueden provenir del refino del petróleo o bien de reacciones petroquímicas. Los primeros son los denominados aceites minerales y los segundos son conocidos como aceites sintéticos.

Los aceites base de tipo mineral están constituidos por tres tipos de compuestos: parafínicos, nafténicos y aromáticos, siendo los primeros los que

se encuentran en mayor proporción entre el 60 y 70 %. Estos por tener las mejores propiedades lubricantes, pero siempre hay compuestos nafténicos y aromáticos que aportan propiedades que no tienen las parafinas (comportamiento a bajas temperaturas, poder disolventes y otros).

Las bases sintéticas son sustancias prácticamente puras que poseen ciertas características especiales que las diferencian de las bases minerales, como son:

- Mejores propiedades lubricantes
- Mayor índice de viscosidad
- Mayor fluidez a baja temperatura
- Mayor estabilidad térmica y a la oxidación
- Menor volatilidad

El aceite base no puede cumplir, por sí solo, todas las funciones descritas con anterioridad. Tampoco podría soportar las condiciones a veces críticas de funcionamiento de los motores. Por esta razón es necesario agregar aditivos a los aceites con ciertas sustancias que varían según:

La aplicación del lubricante:

- Motor
- Engranajes
- Sistemas hidráulicos

Las condiciones de trabajo:

- Monogrado

- Multigrado
- Motor gasolina
- Motor diésel

Nivel de prestaciones que se desea alcanzar:

- Clasificación ACEA
- Clasificación API
- Clasificación SAE
- Clasificación CCMC
- Normas MIL
- Especificaciones de fabricantes

2.14.1.1. Índice de viscosidad

Esta es la propiedad fundamental y más importante de un lubricante líquido. Se puede definir como su resistencia a fluir o lo que es lo mismo, la medida del rozamiento interno de sus moléculas.

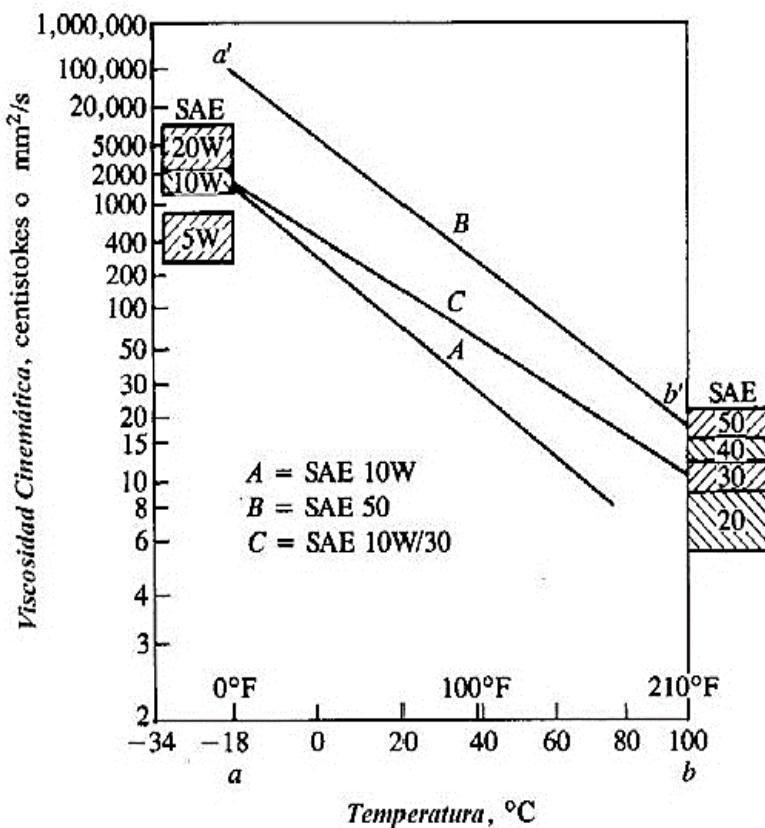
La viscosidad se determina midiendo el tiempo requerido para que un volumen fijo de aceite fluya a través de un orificio de un tubo capilar que se encuentra en un medio a temperatura controlada. La viscosidad de un lubricante decrece con el incremento de la temperatura (ver figura 29). Se requiere baja viscosidad a temperatura ambiente y alta viscosidad a motor caliente.

La clasificación de los lubricantes para motores de combustión interna más usada es la de SAE. Esta depende únicamente de la viscosidad del aceite.

Hay 7 clasificaciones diferentes SAE 5W, 10W, 20W, 20, 30, 40 y 50. Cada número corresponde a un rango de viscosidad.

Según la clasificación SAE para los aceites, los números seguidos por la letra W (*Winter*) son empleados en climas fríos, su viscosidad se determina en laboratorio a una temperatura de -18 °C. Sin winter indica que son aceites propios para climas cálidos. Estos se basan en viscosidad medida a 99 °C. El aceite multigrado (por ejemplo un SAE 10W – 40) satisface condiciones de servicio a bajas y altas temperaturas. Estos tienen índices de viscosidad mayores que los aceites de un solo grado.

Figura 29. Curvas SAE para la viscosidad en función de la temperatura



Fuente: AGUDELO, John. Motores Térmicos. p. 174.

2.14.1.2. Aditivos

Durante la vida útil de servicio, cualquier motor de combustión interna y el aceite que lo lubrica están expuestos a la acción nociva de diversos agentes como son el oxígeno y la humedad del aire, altas presiones y temperaturas desarrolladas, productos químicos originados por el propio proceso de funcionamiento. Un buen lubricante debe ser capaz de resistir estos agentes perjudiciales, esto es, tener estabilidad y evitar. Además, que ataquen los distintos componentes del equipo para conseguir una larga vida del mismo.

En orden a mejorar su estabilidad, el aceite base incorpora aditivos antioxidantes que reaccionan con agentes como el oxígeno, radicales libres o peróxidos, neutralizando el poder oxidante de estos frente al aceite. Es decir, los aditivos antioxidantes se oxidan para evitar la oxidación del aceite, y se consumen, por lo que llega un momento en que es necesaria la sustitución del aceite. Es importante mencionar que la estabilidad térmica no puede ser mejorada con aditivos, y depende exclusivamente de la composición química del aceite base.

Para proteger al motor de todas las sustancias que pueden resultar nocivas, el aceite base mejora sus propiedades intrínsecas con aditivos:

- Estabilidad a la oxidación: se refiere a la degradación del aceite lubricante por oxidación de los hidrocarburos que lo componen. Se debe a las elevadas temperaturas del aceite y de las partes del motor en movimiento, a la presencia del oxígeno, a la naturaleza de las superficies metálicas y a los productos de la combustión. Contribuye a la formación de depósitos. Las temperatura del aceite en el cárter es de

aproximadamente 130 °C. Los aditivos antioxidantes son en mayoría aminas, fenoles, ditiofosfatos, sulfuros y otros.

- Detergente/dispersión: la propiedad de detergencia está dada en aceites minerales por los aditivos; su función es reducir la cantidad de depósitos y asegurar su remoción. A baja temperatura los depósitos se deben principalmente a los subproductos de la combustión. A elevadas temperaturas provienen de las fracciones oxidadas del aceite.
- Reducción del desgaste: el desgaste es debido a los efectos individuales y combinados de la corrosión, la adhesión (contacto metal–metal) y a la abrasión. El ataque corrosivo por productos ácidos de la combustión es el principal causante del desgaste de las camisas y los anillos. La abrasión resulta de la presencia de polvo, esquirlas metálicas y del aceite lubricante que se almacena en los filtros.
- Antiespumante: la formación de espuma en un lubricante es motivo de serios problemas, debido a que la capacidad lubricante del aceite disminuye y favorece su oxidación. Pequeñas cantidades de varias siliconas pueden controlar la formación de espuma, rompiendo la interface líquido–aire como las polidimetilsiliconas más usadas en el aceite del motor.
- Depresores del punto de fluidez: las parafinas que están en el lubricante tienden a cristalizar a medida que baja la temperatura, lo cual trae como consecuencia la disminución de fluidez en el aceite. Los aditivos depresores del punto de fluidez retardan la cristalización de las parafinas cambiando la forma y tamaño de los cristales mediante un efecto de adsorción, sin interferir con las propiedades del aceite.

3. PRODUCCIÓN Y MANEJO DEL HIDRÓGENO

3.1. Introducción

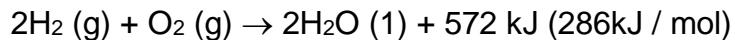
Se sabe que el hidrógeno es el material químico más abundante de todo el universo constituyendo un aproximado del 75 % de la materia visible. Las estrellas están compuestas principalmente por hidrógeno en estado de plasma. El hidrógeno en estado puro es raro encontrarlo en la tierra, la mayor parte del mismo debe ser obtenido en el lugar y en el momento que se necesita. No obstante hoy en día existen diversos métodos desarrollados para obtener este gas; se sabe que la mayor parte de este se obtiene a través del petróleo.

En 1766 Henry Cavendish fue el primero en reconocer el hidrógeno gaseoso como una sustancia discreta, identificando el gas producido como aire inflamable y en 1781 descubrió que el gas producía agua cuando se quemaba. En 1783, Antoine Lavoisier dio al elemento el nombre de hidrógeno que significa generador de agua, cuando él y Laplace reprodujeron el descubrimiento de Cavendish, donde se produce agua cuando se quema el hidrógeno.

3.2. Propiedades generales del hidrógeno

El hidrógeno puro es incoloro, inodoro, y sin sabor en su forma gaseosa el hidrógeno es casi invisible al ojo humano y no es tóxico, pero puede actuar como un asfixiante por desplazar el oxígeno del aire.

El hidrógeno gaseoso es altamente inflamable y se quema en las concentraciones del 4 % vol. o más de H₂ en el aire. La entalpia de combustión de hidrógeno es de -286 kJ/mol; él se quema de acuerdo con la siguiente ecuación balanceada.



Cuando se mezcla con oxígeno a través de una variedad de proporciones, el hidrógeno explota por ignición y se quema violentamente en el aire, la temperatura de autoencendido es de 560 °C. Las llamas de la mezcla hidrógeno–oxígeno en estado puro, se encuentran en la gama de color ultravioleta y son casi invisibles al ojo humano. Otra característica que es importante destacar de la combustión del hidrógeno es que las llamas tienden a ascender rápidamente en el aire, causando menos daño que la combustión de hidrocarburos.

El hidrógeno reacciona directamente con otros elementos oxidantes, una reacción espontánea y violenta puede ocurrir a temperatura ambiente con cloro y flúor, formando los haluros de hidrógeno correspondientes.

Tabla IX. Propiedades generales del hidrógeno

Masa atómica	1,009767 u
Radio medio	25 pm
Electronegatividad	2,2 Pauling
Radio atómico	53 pm
Radio covalente	37 pm
Radio de van der Waals	120 pm
Estados de oxidación	1, -1
Óxido	Anfótero
Energía de ionización	1 312 kJ / mol

Continuación de la tabla IX.

Densidad	0,0899 kg /m ³
Punto de fusión	14,025 K (-259 °C)
Punto de ebullición	20,268 K (-253 °C)
Punto de inflamabilidad	255 K (-18 °C)
Entalpía de vaporización	0,44936 kJ / mol
Entalpía de fusión	0,05868 kJ /mol
Presión de vapor	209 pa a 23 K
Volumen molar	22,24 X 10 ⁻³ m ³ / mol
Estructura cristalina	Hexagonal
Calor específico	1,4304 X 10 ⁴ J(K*kg)
Conductividad eléctrica	-S/m

Fuente: Hidrógeno. www.wikipedia.org. Consulta: 23 de noviembre de 2014.

La solubilidad del hidrógeno con diversos metales es muy importante en la metalurgia puesto que muchos sufren fragilidad en presencia del hidrógeno por eso es necesario desarrollar formas mucho más seguras de almacenarlo para su uso como combustible. El hidrógeno es altamente soluble en diversos compuestos que poseen tierras raras y metales de transición, y puede ser disuelto tanto en metales cristalinos como amorfos.

3.2.1. Propiedades físicas

El hidrógeno es el gas más ligero en la tierra su densidad es de 89 g/m³ a una temperatura de 15 °C y 1 bar de presión. Es por eso que el gas al escaparse suele elevarse inmediatamente hacia la atmósfera y suele acumularse en los techos o zonas similares.

El hidrógeno se almacena en forma de gas en cilindros o tanques a temperatura ambiente a altas presiones de hasta 300 bar. Se almacena y se transporta casi sin presión en forma de hidrógeno criogénico líquido en

recipientes aislados. La liberación de la presión de hidrógeno a temperatura normal tiene como resultado un ligero aumento de la temperatura, esta se eleva desde 20 hasta 25 °C cuando la presión cae desde 175 hasta 1 bar. Este aumento de la temperatura no es suficiente para que el hidrógeno se autoencienda ya que la temperatura de ignición se encuentra cerca de los 600 °C.

3.2.1.1. Densidad

El hidrógeno tiene el peso atómico más bajo que cualquier otra sustancia y por esto posee una densidad muy baja en su estado líquido o gaseoso. Se sabe que la densidad es medida como la cantidad de masa contenida dentro de una unidad de volumen.

Los valores de densidad solo tienen significado a una temperatura y a una presión específica debido a que ambos parámetros afectan la compactividad del arreglo molecular, especialmente en un gas. La densidad de un líquido se conoce como densidad líquida y la de un gas densidad de vapor.

Tabla X. **Densidades del hidrógeno frente a otros combustible**

Sustancia	Densidad de vapor a 20 °C y 1 bar	Densidad líquida a punto normal de ebullición y 1 bar
Hidrógeno	0,083 kg/m ³	70,800 kg/m ³
Metano	0,650 kg/m ³	422,800 kg/m ³
Gasolina	4,400 kg /m ³	700 kg/m ³

Fuente: ROBLES, Felipe. *Fundamentos de la generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible utilizando hidrógeno.* p. 40.

3.2.1.2. Volumen específico

Es el volumen ocupado por una unidad de masa de un material. El volumen específico del hidrógeno es de 11,9 m³/kg a 20 °C y 1 bar de presión. El volumen específico del hidrógeno líquido es de 0,014 m³/kg a -253 °C y 1 bar de presión.

3.2.1.3. Gravedad específica

Es la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad de la sustancia base o de referencia, ambas a la misma temperatura y presión.

Para los gases la sustancia base es el aire con una densidad de 1203 kg/m³ y por eso tiene una gravedad específica de 1,0 con respecto a él mismo. Los gases con una gravedad específica mayor que 1,0 son más pesados que el aire y; aquellos que tienen una densidad relativa menor que 1,0 son más ligeros que el aire.

El hidrógeno en su estado gaseoso tiene una densidad de 0,08376 kg/m³ con una gravedad específica de 0,0696. Esto es aproximadamente 7 % de la densidad del aire. Por otra parte el hidrógeno líquido tiene una densidad de 70,8 kg/m³ con una gravedad específica de 0,0708.

3.2.2. Propiedades químicas

Cuando el hidrógeno se combina con el aire o el oxígeno y se enciende quema en el agua y también puede reaccionar con otros agentes oxidantes, por ejemplo, cloro o gas de la risa. Cuando el hidrógeno se combina con un agente oxidante y luego se enciende, el proceso de combustión puede ser explosivo. Si

este proceso se lleva a cabo dentro de una sala cerrada, con un aumento rápido de presión, puede ser muy destructivo, y tiene lugar a causa del calor generado.

Los niveles de concentración en el que el hidrógeno puede reaccionar con el aire a presión normal y temperatura normales, en comparación con otros gases combustibles, es muy amplia, el límite inferior de explosividad LEL es del 4 % vol. Y el límite superior de explosividad UEL es del 75,6 % vol. Las mezclas de hidrógeno–aire se encienden a través de las fuentes de ignición que contienen muy poca energía. La cantidad necesaria para encender el hidrógeno es de 0,019 mJ esto solamente es 1/10 de la energía necesaria para encender el gas propano.

3.2.2.1. Compuestos

A pesar de que el H₂ no es muy reactivo en condiciones normales, forma multitudes de compuestos con la mayoría de los elementos químicos. Se conocen millones de hidrocarburos, pero no se generan por la reacción directa del hidrógeno elemental con el carbono. El hidrógeno puede formar compuestos con elementos más electronegativos, tales como los halógenos (flúor, cloro, bromo, yodo) o los calcógenos (oxígeno, azufre, selenio). En estos compuestos, el hidrógeno adquiere carga parcial positiva debido a la polaridad del enlace covalente. Cuando se encuentra unido al flúor, al oxígeno o al nitrógeno, el hidrógeno puede participar en una modalidad de enlace no covalente llamado enlace de hidrógeno o puente de hidrógeno, que es fundamental para la estabilidad de muchas moléculas biológicas.

El hidrógeno también puede formar compuestos con elementos menos electronegativos, tales como los metales o semimetales, en los cuales adquiere carga parcial negativa. Estos compuestos se conocen como hidruros.

Algunos ejemplos de compuestos covalentes importantes que contienen hidrógeno son: amoniaco (NH_3), hidracina (N_2H_4), agua (H_2O), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), y otros.

3.2.2.2. Reactividad

Es una característica de todos los combustibles químicos, una reacción química ocurre cuando las moléculas de combustible forman enlaces con el oxígeno contenido en el aire particularmente. Así al final, las moléculas que reaccionan están en un estado de energía más bajo que las moléculas iniciales sin reaccionar.

Conforme las moléculas reaccionan, el cambio de estado de la energía química está acompañado de una correspondiente liberación de energía que se aprovecha para realizar el trabajo útil. Esto es verdadero tanto para una reacción por combustión (como la que ocurre dentro de un motor de combustión interna donde la energía es liberada explosivamente como calor). También en una reacción electroquímica como la que hay dentro de las baterías o de las celdas de combustible donde la energía es liberada como un potencial eléctrico y calor.

Muchas veces las reacciones químicas requieren una pequeña cantidad de energía de activación para arrancar, pero luego la energía liberada por la reacción, alimenta las reacciones futuras en efecto dominó. Así, cuando una pequeña cantidad de energía de activación, en forma de chispa, se le provee a

una mezcla de hidrógeno y oxígeno, las moléculas reaccionan vigorosamente, liberando una cantidad sustancial de calor, con agua como producto final. Esta reacción se experimenta como fuego o explosión y el producto final que es agua se evapora instantáneamente en forma de vapor súper caliente.

3.2.2.3. Reacciones por la combustión

Todos los átomos presentes al inicio de la reacción están también al final de la misma, aunque están reorganizados en moléculas diferentes.

El oxígeno reacciona con el carbono para formar monóxido de carbono y dióxido de carbono. Este último no provoca partículas en suspensión y es benigno para los seres humanos, pero es uno de los grandes responsables del cambio climático. El monóxido de carbono es venenoso para los seres humanos limitando severamente la habilidad de la sangre de transportar oxígeno a los tejidos del cuerpo.

El oxígeno reacciona con el nitrógeno para formar óxido de nitrógeno, este daña el tejido pulmonar causando tos y dolor de pecho. El oxígeno también reacciona con el azufre de los combustibles formando óxido sulfúrico. El azufre es la base de las cenizas, las cenizas grandes son visibles y pueden ser filtradas. Las cenizas pequeñas menores a 2,55 micrones, no son visibles y se depositan en los pulmones causando células cancerígenas.

Se podría decir que el hidrógeno es el combustible ideal, ya que este no produce ningún tipo de *smog* al combustionarlo, no contiene carbono o azufre y por lo tanto no se crea monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxido sulfúrico, óxido de nitrógeno y cenizas. El hidrógeno no es tóxico y por lo tanto los residuos que no combustionan no ocasionan ningún tipo de riesgo para la

salud de los seres humanos. Al combustionar hidrógeno en los motores de combustión interna, el aceite lubricante residual que dejan los anillos del pistón podrían causar una leve contaminación debido a la quema de este aceite.

3.2.3. Propiedades térmicas

Cada combustible puede liberar una cantidad fija de energía cuando reacciona completamente con el oxígeno para formar agua. Este contenido de energía es medido experimentalmente y es cuantificado por un valor calorífico alto y un valor calorífico bajo del combustible se indican a continuación.

Tabla XI. **Valores caloríficos de algunos combustibles**

Combustible	Valor calorífico alto a 25 °C y 1 bar	Valor calorífico bajo a 25 °C y 1 bar
Hidrógeno	141,86 kJ/g	119,93 kJ/g
Metano	55,53 kJ/g	50,02 kJ/g
Propano	50,36 kJ/g	45,60 kJ/g
Gasolina	47,50 kJ/g	44,50 kJ/g
Diésel	44,80 kJ/g	42,50 kJ/g
Metanol	19,96 kJ/g	18,05 kJ/g

Fuente: ROBLES, Felipe. *Fundamentos de la generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible utilizando hidrógeno*. p. 48.

El valor calorífico alto y bajo representan una cantidad de energía por unidad de masa de combustible en kilogramos. El hidrógeno posee la más alta relación de energía-peso de todos los combustibles debido a que es el elemento más ligero, porque no posee átomos de carbono pesados. Esta es una de las razones por la cual el hidrógeno se utiliza en los programas espaciales.

La cantidad de energía liberada, durante la reacción del hidrógeno sobre una unidad base de masa, es aproximadamente 2,5 veces el calor de combustión en comparación a los hidrocarburos comunes como la gasolina, diésel, metano y otros. Así, para un servicio de carga dado, la masa de hidrógeno requerida es solo una tercera parte de la masa necesaria de hidrocarburos comunes.

El alto contenido de energía del hidrógeno también implica que la energía de una explosión de hidrógeno es 2,5 veces la de los hidrocarburos comunes. Entonces sobre la base de una misma cantidad de masa, una explosión de hidrógeno es más destructiva. Sin embargo, la duración del incendio es inversamente proporcional a la energía de combustión, y los incendios con hidrógeno se calman mucho más rápidamente que los incendios con hidrocarburos comunes.

3.2.3.1. Poder calorífico

Es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. El poder calorífico expresa la energía que puede liberar la unión química entre el combustible y comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible, menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias formadas por la combustión.

3.2.3.1.1. Poder calorífico superior

Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de volumen de combustible cuando el vapor de agua originado en la

combustión está condensado. Por consiguiente, se tiene en cuenta el calor desprendido en este cambio de fase.

El poder calorífico de una muestra de combustible se mide en una bomba calorimétrica. La muestra de combustible y un exceso de oxígeno se inflama en la bomba y tras la combustión, se mide la cantidad de calor. La bomba se enfriá con este fin a temperatura ambiente. Durante dicho enfriamiento, el vapor de agua se condensa y este calor de condensación del agua incluido en el calor resultante.

3.2.3.1.2. Poder calorífico inferior

Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de volumen de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado en la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor. Es el valor que interesa en los usos industriales, por ejemplo hornos o turbinas, en los que los gases de combustión que salen por la chimenea o escape están a temperaturas elevadas, y el agua en fase vapor no condensa.

Tabla XII. **Tabla comparativa de calores específicos en combustibles**

Combustible	Densidad	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg	Estado
Hidrógeno	0,089 kg/m ³	120 011 kJ/kg	141 853 kJ/kg	Gaseoso
Propano	1,85 kg/m ³	46 350 kJ/kg	50 450 kJ/kg	Gaseoso
Etanol	790 kg/m ³	26 790 kJ/kg	29 720 kJ/kg	Líquido
Gasolina	730 kg/m ³	43 950 kJ/kg	46 885 kJ/kg	Líquido
Diésel	850 kg/m ³	42 275 kJ/kg	43 115 kJ/kg	Líquido

Fuente: ROBLES, Felipe. *Fundamentos de la generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible utilizando hidrógeno*. p. 50.

3.2.3.2. Densidad de energía

El contenido de energía indica la cantidad de energía por unidad de masa de combustible, la densidad de energía denota la cantidad de energía por unidad de volumen de combustible.

La densidad de energía es realmente la medida de qué tan compactos están los átomos de hidrógeno en el combustible. Los combustibles hidrocarburos que aumentan en complejidad tienen mayor densidad de energía. Al mismo tiempo, estos mismos tienen más átomos de carbono por cada molécula siendo más pesados en términos absolutos.

Debido a la baja densidad de energía del hidrógeno se puede decir que es desventaja en comparación a otros combustibles, aunque su relación de energía-peso es la mejor de todos los demás debido a su ligereza.

Tabla XIII. **Densidad de energía de distintos combustibles**

Combustible	Densidad de energía	Presión	Estado	Temperatura
Hidrógeno	10 050 kJ/m ³	1 bar	Gaseoso	15 °C
	1 825 000 kJ/m ³	200 bar	Gaseoso	15 °C
	4 500 000 kJ/m ³	690 bar	Gaseoso	15 °C
	8 491 000 kJ/m ³		Líquido	
Metano	32 560 kJ/m ³	1 bar	Gaseoso	15 °C
	6 860 300 kJ/m ³	200 bar	Gaseoso	15 °C
	20 920 400 kJ/m ³		Líquido	
Propano	86 670 kJ/m ³	1 bar	Gaseoso	15 °C
	23 488 800 kJ/m ³		Líquido	15 °C
Gasolina	31 150 000 kJ/m ³		Líquido	25 °C
Diésel	31 435 800 kJ/m ³		Líquido	25 °C

Fuente: UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. *Manuales de termodinámica y termotecnia*. p. 3.

La densidad de energía es afectada si el combustible es almacenado como un líquido o como gas; y si es almacenado en estado gaseoso la presión influye en su densidad.

3.2.3.3. Punto de encendido

Todo combustible se quema solo cuando se encuentra en su estado gaseoso o de vapor. Los combustibles como el hidrógeno y el metano son gases en condiciones ambientales, mientras que otros combustibles como la gasolina y el diésel que son líquidos deben ser vaporizados antes de ser combustionados. La característica que describe qué tan fácil estos combustibles pueden ser convertidos en vapor, se le conoce como el punto de encendido. El punto de encendido está definido como la temperatura a la cual el combustible produce suficiente vapor para formar una mezcla con el aire, incendiable, en su superficie.

Si la temperatura del combustible está más baja que el punto de encendido, no podrá producir suficiente vapor para quemarse debido a que su porcentaje de evaporación es muy bajo. Siempre que el combustible esté en o sobre el punto de encendido, habrá vapor presente. El punto de encendido no es la temperatura a la cual el combustible estalla en llamas; ésa es la temperatura de autoencendido.

El punto de encendido es siempre menor que el punto de ebullición. Para combustibles que son gases en condiciones normales, el punto de encendido es bastante menor que la temperatura ambiente y tiene poca relevancia debido a que el combustible ya está totalmente evaporado a temperatura ambiente. Para combustibles en estado líquido como la gasolina y el diésel, el punto de encendido actúa como el límite de temperatura bajo de encendido.

Tabla XIV. Punto de encendido de algunos combustibles

Combustible	Punto de encendido
Hidrógeno	-253 °C
Metano	-188 °C
Propano	-104 °C
Gasolina	-43 °C
Etanol	11 °C

Fuente: ROBLES, Felipe. *Fundamentos de la generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible utilizando hidrógeno.* p. 52.

3.2.3.4. Rango de inflamabilidad

El rango de inflamabilidad de un gas está definido en términos de su límite de inflamabilidad bajo (LFL) y su límite de inflamabilidad alto (ULF). El LFL de un gas es la concentración de gas más baja que podrá sostener una llama autopropagada cuando se mezcla con aire y se enciende. Por debajo del LFL, no hay combustible suficiente para sostener una combustión, la mezcla de combustible y aire es muy pobre.

El ULF de un gas es la concentración del mismo más alta que podrá sostener una llama autopropagada cuando se mezcla con aire y enciende. Sobre el ULF, no hay oxígeno suficiente para sostener una combustión porque la mezcla de aire-combustible es muy rica. Entre los dos límites está el rango de inflamación en el cual el gas y el aire están en proporciones adecuadas para quemarse cuando se enciende.

Una mezcla estequiométrica ocurre cuando las moléculas de oxígeno e hidrógeno están presentes en la relación exacta necesaria para completar la relación de combustión. Si hay más hidrógeno que oxígeno disponible,

entonces la mezcla es rica y por ello un poco de combustible quedará sin reaccionar, aunque se consuma todo el oxígeno. Si hay menos hidrógeno que oxígeno disponible, entonces la mezcla es pobre y por ello todo el combustible será consumido, pero quedará un poco de oxígeno sin reaccionar. Los sistemas de combustión interna y de celdas de combustible generalmente trabajan con mezclas pobres debido a que esta situación promueve la reacción completa de todo el combustible disponible.

Una consecuencia del UFL es que el hidrógeno almacenado, ya sea en estado líquido o gaseoso, no es inflamable debido a la ausencia de oxígeno en los cilindros. El combustible solamente se vuelve inflamable en las superficies periferias de una fuga, donde se mezcla con aire en una proporción adecuada.

3.2.3.5. Temperatura de autoencendido

Es la que se requiere como mínimo para iniciar una combustión autosostenida en una mezcla de combustible en ausencia de una fuente de ignición o encendido. Dicho en otras palabras, el combustible se calienta hasta que explota en una llama.

Cada combustible posee una única temperatura de encendido, en caso del hidrógeno es relativamente alta en comparación de otros combustibles y es de 585 °C. Esto hace que sea difícil encender una mezcla de hidrógeno y aire a base de calor sin utilizar alguna fuente de ignición adicional. La temperatura de autoencendido de diferentes combustibles se muestra en la siguiente tabla.

Tabla XV. Temperatura de autoencendido de combustibles comparables

Combustible	Temperatura de autoencendido
Hidrógeno	585 °C
Metano	540 °C
Propano	490 °C
Metanol	385 °C
Gasolina	230 a 480 °C
Diésel	240 °C

Fuente: ROBLES, Felipe. *Fundamentos de la generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible utilizando hidrógeno.* p. 52.

3.2.3.6. Energía de ignición

Aunque el hidrógeno tiene una mayor temperatura de autoencendido que el metano, el propano y la gasolina, su energía de ignición es de 0.02 mJ, de magnitud menor y por ende es más fácil de encender. Una chispa invisible o una descarga de electricidad estática proveniente del cuerpo humano podrían tener la energía suficiente para causar un encendido. Sin embargo, es importante darse cuenta que la energía de encendido para todos estos combustibles es relativamente baja y cualquier fuente de ignición que sea capaz de incendiárlas también es capaz de incendiar cualquiera de los otros.

Otra propiedad del hidrógeno es una baja electroconductividad así que el flujo o agitación del hidrógeno líquido o gaseoso puede generar cargas electroestáticas que dan como resultados chipas. Por esta razón, todo el equipo que transporte hidrógeno debe estar sólidamente aterrizado.

3.2.3.7. Velocidad de quemado

Es la velocidad a la cual viaja la flama a través de la mezcla de combustible. La velocidad de quemado es diferente a la velocidad de llama. La velocidad de quemado inicia el rigor de una explosión debido a que grandes velocidades de quemado tienen una gran tendencia a soportar la transición de deflagración a detonación en túneles largos o pipas. La velocidad de llama es la suma de la velocidad de quemado y la velocidad de desplazamiento de la mezcla de gas sin quemarse.

La velocidad de quemado varía con la concentración de gas y cae en ambos finales del rango de inflamación. Debajo de LFL y encima del UFL la velocidad de quemado es igual a cero.

La velocidad de quemado del hidrógeno está entre 3,25 y 6,25 m/s, es aproximadamente un orden de magnitud mayor que el del metano y la gasolina. Así los incendios de hidrógeno se queman rápidamente, como resultado, tienden a tener un corto tiempo de vida.

3.3. Hidrógeno líquido y su relación de expansión

Los sistemas de almacenaje de hidrógeno en estado líquido, solventan muchos de los problemas relacionados con el peso y el tamaño que tenían los sistemas de almacenaje de gas a alta presión; no obstante, necesitan temperaturas criogénicas. Además, enfriando el hidrógeno hasta que su estado se vuelva líquido aumenta su densidad, con lo que se facilita su transporte.

El hidrógeno líquido puede almacenarse solo por debajo de su punto normal de ebullición (-253 °C) a presión ambiental en un tanque

súper-aislante de doble pared llamado tanque *Dewar*. Este aislamiento es la parte fundamental de la tecnología de estos tanques y está formado por varias capas de vacío separadas por capas de diversas fibras.

El hidrógeno no se puede almacenar en su estado líquido indefinidamente. Absolutamente todos los tanques permiten que una cierta cantidad de calor del ambiente de los alrededores se transfiera al interior del tanque. No obstante, este aislamiento permite que el hidrógeno permanezca en estado líquido dentro del tanque hasta diez días antes de que sea necesario expulsar parte del hidrógeno al exterior, por los aumentos de presión ocasionados por su calentamiento. Una vez que se empieza a producir expulsiones, el ritmo de perdida diaria esta entre 1 y 2 % de su capacidad total.

Los tanques que se emplean a bordo de los vehículos contienen una mezcla bifásica de hidrógeno que se mantiene a una presión entre 3 y 10 bar aproximadamente. Si la presión es demasiado baja, parte del hidrógeno se vaporiza por medio de una resistencia eléctrica o permitiendo el intercambio de calor con el exterior. Por el contrario, si la presión es demasiado elevada se expulsa parte del hidrógeno gaseoso al exterior.

El proceso de licuefacción de hidrógeno requiere mucha energía, entre 30 y 40 % del contenido energético del hidrógeno licuado, y resulta tecnológicamente complejo. De hecho, solo existen unas veinte plantas de este tipo en todo el mundo, de las cuales cuatro se encuentran en Europa: dos en Alemania, una en Holanda y otra en Francia.

Los tanques de almacenaje de hidrógeno líquido estacionarios normalmente son de forma esférica, dado que esta forma geométrica ofrece

una menor área superficial para un volumen determinado (menor superficie de transferencia térmica) y distribuye de manera más uniforme la presión.

Los tanques para vehículos se fabrican con formas cilíndricas, no tanto por la presión interior, sino para minimizar esta superficie de transferencia. Por ello, se intentará que la longitud y el diámetro sean lo más parecidos posible, aunque las necesidades de cada proyecto en concreto pueden forzar a utilizar otras geometrías con peores prestaciones.

Bayerische Motoren Werke (BMW) ha apostado por esta forma de almacenamiento para sus modelos 750 HL. El depósito consiste básicamente en dos capas de acero separadas por una cámara de vacío, donde existen además 70 capas de fibra de vidrio intercaladas con láminas de aluminio que actúan como aislante térmico.

Además, el tanque posee un aislamiento exterior del depósito que actúa como una capa de 4 metros de grosor de estireno, siendo su espesor de sólo 3 centímetros. Todo este aislamiento consigue que el aumento de temperatura por día sea de 1 °C, con lo cual se produce un aumento de la presión de 1 bar/día. Este hecho está también previsto con la inclusión de válvulas que se abren cuando la sobrepresión es de 4 bar, con lo cual se evitan posibles fallos debido a las tensiones generadas.

Por último, el asunto de las explosiones sería causado en vehículos con motor convencional por la reacción del oxígeno del aire y la gasolina en el interior del depósito, pero, en este caso, al no existir aire en el interior, queda descartada esta posibilidad. Hay que excluir también la posibilidad de entrada de aire en el tanque a causa de la mayor presión en que se encuentra sometido el hidrógeno.

3.4. Corrosión de materiales por hidrógeno

El hidrógeno no es corrosivo. A la temperatura normal los habituales materiales metálicos como el acero, cobre, latón, aluminio y otros, son adecuados para almacenar el hidrógeno.

Algunos tipos de aceros pueden ser dañados por el hidrógeno bajo ciertas circunstancias, como por ejemplo, defectos en la producción (agrietamientos e incrustaciones). Es por eso que los materiales utilizados en las instalaciones de hidrógeno tienen que ser elegidos por los expertos, que están familiarizados con el funcionamiento en condiciones específicas.

El hidrógeno es un gas muy flexible debido a que las pequeñas moléculas pueden encontrar camino en los materiales fisurados, que para otros materiales podrían ser impermeables. Los materiales de fundición no deben utilizarse para el hidrógeno, debido a su porosidad podría ser la causa de fugas.

Debido a su baja temperatura, el hidrógeno líquido puede causar la fragilidad del caucho, plástico y acero al carbono. Debido a esto la ductilidad de estos materiales pueden ser extremadamente reducidas. Es por eso que estos materiales no son adecuados para su uso en instalaciones de hidrógeno líquido.

3.5. Efectos fisiológicos

Como se había mencionado el hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido y por lo tanto no puede ser percibido con los sentidos humanos. El hidrógeno no es tóxico, cuando es inhalado en grandes concentraciones causará la asfixia. No se debe permitir la presencia en un ambiente cargado con

hidrógeno, debido al peligro de explosión. Por esta razón, la protección respiratoria no es relevante cuando se trabaja con hidrógeno.

El hidrógeno líquido o gaseoso (evaporado) puede causar quemaduras criogénicas al entrar en contacto con la piel. Esto tambien ocurre cuando la piel entra en contacto con cualquier tubería sin aislar o equipos que contengan hidrógeno líquido.

El hidrógeno no impone un peligro para el medio ambiente, no daña la capa de ozono y no contribuye al efecto invernadero. El resultado de la combustión de este gas es solamente agua y no dióxido de carbono u hollín.

Tabla XVI. **Síntomas dependiendo de la concentración de hidrógeno**

% en volumen de hidrógeno en el aire	Síntomas
81-85%	Disminución de la capacidad de ejecución de tareas; puede inducir a síntomas prematuros en personas con problemas de corazón, pulmón o circulatorios
85-88 %	Respiración profunda, aceleración del pulso y disminución de la coordinación motora.
88-90 %	Vértigo, disminución de la conciencia, labios levemente azules.
90-92 %	Nauseas, vómitos, inconciencia, palidez, desmayo, fallos mentales.
92-94 %	Muerte en 8 minutos; con tratamiento en 6 minutos el 50% muere y el 50% se recupera; el 100% se recupera con un tratamiento en 4 a 5 minutos.
96 %	Coma en 40 segundos, convulsiones, paro respiratorio y la muerte.

Fuente: XAUDARAÓ Crístian. *Inyección de hidrógeno como potencia en los motores*. p. 34.

3.6. Características de las mezclas de gases con hidrógeno

Las mezclas de los gases no se separan bajo la influencia de la gravedad. Cuando, por ejemplo, una mezcla de hidrógeno–argón se escapa en un ambiente, el hidrógeno no se acumula en el techo y el argón no se separa acumulándose en el suelo. La mezcla se mueve hacia arriba en su conjunto, cuando es más ligero que el aire, y hacia abajo cuando es más pesado que el aire. Al hacer esto se mezcla continuamente en el aire. Las mezclas de hidrógeno con helio o nitrógeno son siempre más ligeras que el aire. Las mezclas de hidrógeno–argón, de hasta 71 % vol. de argón, son más ligeras que el aire y con un contenido más alto de argón más pesado que el aire.

Las mezclas de hidrógeno–gas inerte son mezclas combustibles cuando su contenido de hidrógeno está por encima de ciertos niveles. Los valores correspondientes se han estandarizado en la Norma ISO 10156. Se especifica que las mezclas de hidrógeno–nitrógeno con más de 5,7 % vol. H₂. Y las de hidrógeno–helio y de hidrógeno–argón con más de 2,9 % vol. H₂ son combustibles. Los valores indicados son valores teóricos y están dentro de un criterio seguro y se utiliza para clasificar una mezcla de gas de acuerdo con la normativa. Los valores de umbral actual de combustibilidad, que han sido identificados en los experimentos para su contenido de hidrógeno, son algo mayor en las mezclas de hidrógeno–gas inerte.

3.7. Producción de hidrógeno por medio de algas

Como ya se ha mencionado el hidrógeno debe de obtenerse mediante la separación de los elementos de otras sustancias existentes en la naturaleza. Así pues se podrá obtener hidrógeno a partir de hidrocarburos, agua y procesos biológicos.

En la actualidad, del hidrógeno producido se destina el 72 % a la industria química, el 9 % a la electrónica, el 8 % a la aeroespacial, el 3 % a la metalurgia y el resto a otras actividades.

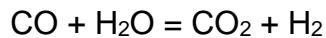
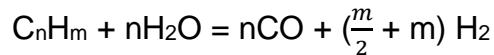
3.8. Producción mediante hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. La estructura molecular consiste en un armazón de átomos de carbono a los se unen los átomos de hidrógeno. Las cadenas de átomos de carbono pueden ser lineales o ramificadas y abiertas o cerradas.

3.8.1. Reformado mediante vapor

Se llama proceso de reformado a la reacción catalítica de una mezcla de vapor de agua e hidrocarburos a una temperatura más o menos alta para formar hidrógeno, monóxido de carbono y bióxido de carbono.

Las reacciones básicas y más usadas industrialmente son:



Para el procedimiento de reformado mediante vapor los combustibles que mejor responden a la reacción son los hidrocarburos ligeros; entre ellos el gas natural, el propano y butano. También puede usarse gasolina con el empleo de un catalizador adecuado.

El uso de estos hidrocarburos ligeros es debido a que el procedimiento debe llevarse a cabo con el combustible en estado gaseoso y libre de impurezas que pudieran desactivar los catalizadores, por ejemplo el azufre. Así en primer lugar se realizará una purificación de la materia base, mediante un proceso de desulfurado.

Seguidamente, se produce una primera reacción en hornos tubulares a una temperatura entre 800 y 900 °C y una presión entre 20 y 25 bar. Aquí se obtiene un gas rico en dióxido de carbono e hidrógeno, y en menor cantidad monóxido de carbono. Dicha reacción es endotérmica.

A continuación de la primera reacción se elimina el monóxido de carbono, por medio de reacciones de cambio de alta a baja temperatura a 400 y 200 °C respectivamente y se produce una mezcla gaseosa de H₂, CO₂, H₂O y en pocas cantidades CO y CH₄. Esta segunda reacción es exotérmica, pero no puede aportar energía suficiente que requiere la primera, así que se usa metano como reactivo y combustible para aportar la energía que falta.

Finalmente, este gas resultante rico en hidrógeno se separa del agua mediante condensación y se purifica mediante un sistema de membranas separadoras, llamado *PSA Pressure Swing Adsorption*. De aquí sale un hidrógeno puro al 99,99 %, cuyo contenido energético es mayor al del hidrocarburo del cual procede.

Como catalizador se utiliza níquel para la reformación vapor–hidrocarburo y óxido de hierro para la reacción del CO.

3.8.2. 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. Este alcanza una temperatura entre 700 y 1 500 °C. Si el carbón es calentado mediante fuentes de calor externas el proceso se llama gasificación isotérmica y si se calienta simplemente mediante la reacción exotérmica de la reacción química se denomina gasificación autotérmico.

El proceso que se produce en el gasificador es esencialmente una combustión con defecto de aire (10 a 50 %). 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 (CO , CO_2 , H_2 , CH_4). El producto final es gas de síntesis o sintegas, 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_2 es una de las técnicas que despiertan mayor interés debido a que el recurso se halla muy repartido. Cuando se integra esta técnica en ciclo combinado se pueden producir de manera simultánea hidrógeno y electricidad, derivando la producción hacia el sector energético que más interese.

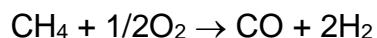
3.8.3. Pirolisis

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 1 200 °C para el carbón y unos 450 °C para la biomasa. La producción de hidrógeno se produce a partir de un gas de síntesis (sintegas) como el del proceso de gasificación constituido por CO y H₂. Dicho proceso también es aplicable a residuos sólidos urbanos, obteniéndose hidrocarburos líquidos que una vez reformados producen hidrógeno.

3.8.4. Proceso parcial de oxidación de hidrocarburos

Este proceso se denomina POX y consiste en oxidar el CH₄ de manera parcial, siguiendo la reacción:



La principal ventaja de este procedimiento es su compatibilidad con hidrocarburos líquidos, como diésel y *fuel oil*. Existen dos tipos de oxidación, la oxidación parcial térmica TPOX y la oxidación parcial catalítica CPOX.

Las reacciones TPOX son independientes 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 entre los 800 y 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 usará el procedimiento térmico TPOX para los combustibles ricos en azufre.

Dicha reacción se lleva a cabo con una eficiencia del alrededor del 70 %. La presencia de CO no es conveniente, así que se oxida para convertirlo en CO₂ o tratándolo con vapor de agua para generar más hidrógeno. Dado que la reacción es exotérmica no hacen falta quemadores para mantenerla.

Se trata de un procedimiento adecuado para obtener hidrógeno en vehículos equipados con una pila de combustión. Solo se necesita un depósito o tanque con gas natural. El inconveniente añadido, es que para dicha pila, el hidrógeno ha de ser bastante puro.

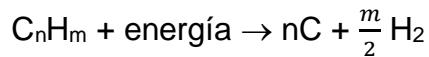
3.8.5. Proceso de reformado autotérmico

Este proceso se trata de una combinación del reformado mediante vapor de agua y el proceso de oxidación parcial POX. Se lleva a cabo en grandes unidades centralizadas aunque recientemente se ha logrado en equipos pequeños. La eficiencia del reformado autotérmico ATR es similar a la de POX.

3.8.6. Proceso *Kvaerner* y reformado mediante plasma

Es un método de reformado desarrollado en 1994 por la empresa noruega Kvaerner 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 1 600 °C produciendo la siguiente reacción:



La mayor ventaja de este sistema 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 desarrollada en el año 2009. En este caso se substituye el quemador de plasma por un convertidor de plasma.

3.9. Producción a partir del agua

El hidrógeno también puede ser obtenido a través del agua por medio de producción biológica en un biorreactor de algas, con electricidad con procesos químicos y por calor. Estos procesos están menos desarrollados que la producción de hidrógeno por medio de hidrocarburos pero su crecimiento aumenta.

3.9.1. Electrólisis

La electrolisis del agua es uno de los procedimientos más limpios, además de los más simples e intuitivos, para obtener hidrógeno. Este proceso, descubierto por M. Faraday en 1820, consiste en descomponer el agua en sus componentes constituyentes, hidrógeno y oxígeno mediante un aporte energético, la electricidad.

Dicha corriente eléctrica puede proceder de fuentes renovables como no renovables. Evidentemente, si se utilizaran energías no renovables como

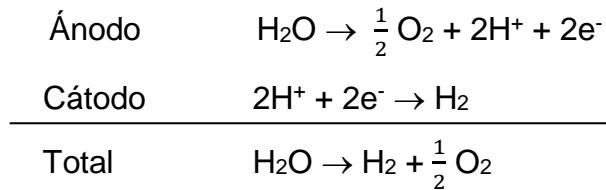
combustibles fósiles no se presentaría como la mejor opción, puesto que mediante procesos de reformado de hidrocarburos los rendimientos son mucho mayores y de menor costo. La electrolisis se presenta como un proceso de obtención de hidrógeno cuya principal ventaja sería su posibilidad de combinarse con las energías renovables. De esta manera que mediante la energía renovable se obtuviera la electricidad necesaria para la electrólisis de una forma, además, rentable.

Conjuntamente a esto, el uso simultáneo de energías renovables permitiría la obtención de un combustible benigno para el medio ambiente a través de un proceso limpio. A diferencia de cómo pasaría con el reformado de hidrocarburos, que para dicha obtención se liberarían emisiones a la atmósfera.

El principio de funcionamiento de la electrólisis es conectar una fuente eléctrica a dos electrodos, comúnmente de algún metal platino o acero inoxidable, que se encuentran sumergidos en el agua que actúa como electrolito facilitando la migración de los iones.

En una célula electrolítica típica el hidrógeno aparecerá en el cátodo (electrodo positivo), mientras que el oxígeno aparecerá en el ánodo (electrodo negativo).

Si se asumiera un rendimiento ideal, la cantidad de hidrógeno generado sería el doble que la mitad de oxígeno, y ambas cantidades serían proporcionales a la carga eléctrica conducida por la solución. La electrólisis suele llevarse a cabo a temperaturas entre 80 y 85 °C y la reacción electroquímica que se da en el proceso de separación del agua en sus componentes es:



Este proceso tiene una eficiencia de entre el 50 y 75 %. Aunque en el año 2002 se publicó en el Journal of Electrochemical Society un artículo de H. Cheng, K. Scott, C. Ramshaw en que se hablaba de un tipo de electrólisis, llamada gravitacional. Y esta trabaja con rendimientos entre 85 y 95 %. Dicha tecnología la comercializó Electro Hydrogen Generator.

Este proceso constituye solo un 4 % de la producción de hidrógeno, aunque la pureza es mayor del 99 %.

3.9.2. Termólisis

Consiste en la separación de los componentes de una sustancia por medio de temperaturas elevadas. Para la ruptura térmica de la molécula del agua, se requieren temperaturas excesivamente elevadas (alrededor de los 2 250 °C), así que en todo caso, la ruptura de manera directa es inabordable.

Los procesos más prometedores para la termólisis del agua consisten en ciclos termoquímicos. Estos ciclos se pueden implantar, ya sea con energía solar concentrada o mediante energía nuclear. El ciclo que mayores eficiencias presenta a temperaturas moderadas es el SI azufre–yodo con un 38 %. Mientras que el ciclo que mejor funciona o se presenta más interesante a temperaturas elevadas es el Zn/Zno (estructuras con propiedades fotocatalíticas mejoradas sintetizados por método de solución acuosa).

3.10. Producción a partir de procesos biológicos

Aunque la mayor parte de los sistemas biológicos de generación de hidrógeno se encuentran aún en fase de desarrollo, su aplicación en el futuro es prometedora. Entre estos procesos destacan la generación fotobiológica y la generación fermentativa.

3.10.1. Producción fotobiológica

Es un proceso llevado a cabo por microorganismos muy variados, desde procariotas a eucariotas y desde fotolitotrofos a quimioorganotrofos. En los microorganismos fotosintéticos son dos las enzimas implicadas en la producción de hidrógeno, las hydrogenasas y las nitrogenasas. Mientras que en los microorganismos no fotosintéticos son varias las rutas fermentativas utilizadas para la producción de hidrógeno.

3.10.2. Producción mediante hidrogenasas

La reacción de generación de hidrógeno por medio de microorganismos fotosintéticos basada en la hidrogenasa puede realizarse de dos formas diferentes, bien en condiciones de iluminación o bien en oscuridad.

La producción en condiciones de iluminación está asociada a la fijación de CO₂ atmosférico en condiciones de iluminación y la posterior producción de hidrógeno en condiciones de ausencia de oxígeno (anaerobiosis) en oscuridad. La mayor limitación de esta forma producción de hidrógeno es la inhibición de la hidrogenasa por la acción del oxígeno generado por el propio metabolismo.

La producción en oscuridad *Scenedesmus*, entre otras algas, es capaz de producir hidrógeno no únicamente bajo condiciones de iluminación, sino también en oscuridad y en anaerobiosis por fermentación, a partir del almidón acumulado intracelularmente. Este segundo sistema de producción, aunque algo menos eficiente, permite realizar un proceso en continuo, ya que no se genera oxígeno que pueda inhibir la enzima hidrogenasa.

3.10.3. Producción por nitrogenasas

La ruta preferente de producción de hidrógeno por cianobacterias es la utilización de la enzima denominada nitrogenasa. Este sistema es específico de bacterias y no existe en organismos eucariotas (algas).

La reacción de producción de hidrógeno por la nitrogenasa está basada en la capacidad que tiene dicha enzima de modificar su función habitual ($N_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 2NH_3$) y catalizar las síntesis de hidrógeno según una reacción distinta ($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$), en presencia de argón.

La enzima nitrogenasa es, al igual que la enzima hidrogenasa, extremadamente sensible a la presencia de oxígeno. Por ello, las cianobacterias deben recurrir a sistemas que impidan la presencia de oxígeno. Existen dos estrategias para lograr evitar dicha inhibición. En algunos casos, la separación del metabolismo productor de oxígeno y la reacción de la nitrogenasa están separada en el tiempo. En otros casos, la actividad fijadora de nitrógeno (y por lo tanto, productora de hidrógeno) se realiza en células especiales denominadas heterocistos.

En este último caso, en las células vegetativas se producen compuestos orgánicos a partir del dióxido de carbono y el oxígeno en condiciones de

iluminación. Mientras que en los heterocistos se produce la generación de hidrógeno.

Otros grupos de bacterias fotosintéticas anaerobias son capaces también de realizar procesos de biofololisis, en condiciones anoxigénicas en presencia de luz, utilizando compuestos orgánicos como fuentes de carbono. Estas eubacterias fotosintéticas, encuadradas en dos grupos relacionados (bacterias rojas no del azufre y bacterias verdes no del azufre), son capaces de obtener elevadas producciones de hidrógeno. Las especies de eubacterias fotosintéticas sobre las que más estudios se han realizado pertenecen al género *Rhodobacter*, fundamentalmente *Rhodobacter sphaeroides* y *Rhodobacter capsulatus*.

3.10.4. Generación fermentativa

Algunos grupos de bacterias fermentadoras tienen la capacidad de generar hidrógeno a partir de azúcares simples por tres rutas que se denominan fermentación butírica, fermentación ácido mixta y fermentación butanodiólica. En las que se generan hasta 2 moles de hidrógeno por mol de glucosa, además de otros subproductos de interés económico.

La fermentación butanodiólica es característica de los géneros *Serratia*, *Enterobacter* y *Bacillus* (aunque en este caso la síntesis de hidrógeno se realiza a partir del ácido pirúvico), siendo los productos de la fermentación butanol, etanol e hidrógeno.

La fermentación ácido-mixta es una fermentación característica de los géneros *Escherichia*, *Salmonella*, *Shigella*, *Proteus*, *Yersinia*, *Photobacterium* y

Vibrio. En las que se producen principalmente una variedad de ácidos (acético, láctico, fórmico), etanol e hidrógeno.

Finalmente, la fermentación butírica permite obtener elevados rendimientos de hidrógeno, junto con ácido butírico, acético y CO₂, a bacterias anaeróbicas de los géneros *Clostridium* y *Sarcina*. La fermentación de la acetona–butanol también realizada por *Clostridium* es otra variante de este proceso.

Un esquema general del proceso de producción fermentativa de hidrógeno se basa en la siguiente reacción:



Este proceso es capaz de generar 0,5 m³ de hidrógeno por kilogramo de hidrato de carbono utilizado. Además de dichos sistemas fotosintéticos y fermentativos, también se han desarrollado sistemas mixtos que combinan diversos procesos a la vez.

3.10.5. Sistemas mixtos

El sistema fermentativo de generación de hidrógeno tiene como limitación la no conversión completa de la materia orgánica presente en el residuo en CO₂ e hidrógeno. Esto sucede debido a que se trata de un sistema fermentativo, que debe mantener el balance de oxidación–reducción final del proceso. Por lo tanto, una vez realizado el proceso de fermentación se obtiene un residuo con una elevada proporción de compuestos orgánicos de bajo peso molecular, que pueden bien ser recuperados como subproductos valorizables, bien utilizados en una segunda etapa de producción de hidrógeno.

3.11. Almacenamiento del hidrógeno

Uno de los grandes problemas en la utilización del hidrógeno es su almacenamiento. Esto se debe a que esta sustancia 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 hidrógeno puede almacenarse en estado gaseoso, líquido o sólido. Dependiendo del estado en que se encuentran se utilizan las siguientes denominaciones:

- LH₂ para el hidrógeno líquido.
- CGH₂ hidrógeno gaseoso comprimido.
- LCGH₂ hidrógeno líquido a gas comprimido, transformado en la misma hidrogenera (estación de servicio).

Figura 30. **Estación de llenado de hidrógeno líquido hidrogenera**



Fuente: Hidrogenera. *ITER*, S.A. Consulta: 21 de septiembre de 2015.

3.11.1. Almacenamiento en estado gaseoso

La técnica más sencilla para almacenar el hidrógeno es comprimiéndolo en fase gaseosa. Actualmente se almacena a unos 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 se respecta 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 (CGH_2) se pueden dividir en los tipos I, II, III, IV dependiendo de sus características constructivas.

Los cilindros del tipo I son tanque de metal, generalmente acero o aluminio que admiten una presión máxima de trabajo de 200 bar para el acero y de 175 bar para el aluminio.

Los de tipo II también son metálicos, pero están reforzados con unos filamentos, generalmente de fibra de vidrio o carbono. Son más ligeros que los anteriores y pueden trabajar aproximadamente hasta presiones de 263 bar los fabricados en aluminio y fibra de vidrio, mientras que los constituidos por 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 *kevlar*) y una fina capa metálica. Esta capa evita que se 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 los de aluminio y *kevlar*.

Finalmente, el tipo IV está totalmente fabricado de materiales compuestos y es el más ligero de todos. Aun así presenta desventajas debido a la difusividad del hidrógeno a través del polímero.

3.11.2. Almacenamiento en estado líquido

Para el almacenamiento líquido del hidrógeno se enfriá hasta su licuación a -253 °C a presión ambiente y debe mantenerse en tanques o cilindros criogénicos especiales. A esas temperaturas su manipulación se complica, un aumento de presión producirá perdidas por sobrepresión, por lo que su uso está más bien reservado a fines industriales. Si se reduce la presión disminuyen los riesgos.

Por otra parte, el consumo energético de esta modalidad es muy elevado. Se consideran unas pérdidas de 30 % respecto a la energía almacenada a la que las derivadas del aporte energético que hay que efectuar para mantener el hidrógeno en estado líquido (alrededor del 1 o 2 % diario).

3.11.3. Almacenamiento en estado sólido

El hidrógeno puede almacenarse en materiales especiales diseñados para actuar como portadores de hidrógeno. Pero el peso y el volumen de estos sistemas son muy elevados.

Si bien generalmente a estos sistemas se les denomina almacenamiento en estado sólido, en la realidad estos sistemas almacenan el hidrógeno, en

estado gaseoso, en materiales mediante distintos mecanismos. Los mecanismos más conocidos para el almacenamiento de hidrógeno basado en materiales son dos: la adsorción y la absorción.

En 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 para una liberación del hidrógeno con mayor facilidad.

Las estructuras metalo-orgánicas (MOF), los clatratos y los hidruros químicos no reversibles son algunos de los materiales que funcionan con el mecanismo de adsorción.

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 utilizarán para almacenar mediante absorción son los hidruros metálicos reversibles, los hidruros complejos y los sistemas de nitrógeno.

3.12. Transporte y distribución para el hidrógeno

Si se pretende que en el futuro la energía se asiente sobre la base de la economía del hidrógeno es preciso crear una infraestructura de distribución para abastecer las demandas de la sociedad. Hoy en día está en discusión la logística más adecuada, planteándose diversas alternativas en función del uso final del hidrógeno.

3.12.1. Transporte en estado líquido

Para su transporte por carretera la licuación del hidrógeno es económicamente viable cuando los volúmenes necesitados son pequeños. El hidrógeno líquido es transportado usando tanques de doble pared aislados para prevenir la evaporación *flash* del hidrógeno líquido. Algunos tanques utilizan un escudo de hidrógeno líquido para enfriar la pared exterior del contenedor de hidrógeno líquido para minimizar la transferencia de calor.

Los camiones cisternas pueden transportar entre 360 y 4 300 kg de hidrógeno líquido. Los vagones tienen mayores capacidades, transportando entre 2 900 y 9 100 kg de hidrógeno. Las tasas de evaporación *flash* en los camiones son entre 0,3 y 0,6 % por día.

Las barcazas y los buques de altura también son considerados para el transporte de hidrógeno por mar a largas distancias. La evaporación *flash* en los buques se estima entre 0,2 a 0,4 % por día. Canadá ha desarrollado el diseño de algunos barcos para el transporte trasatlántico de hidrógeno. Ninguno de estos barcos se ha construido aún.

Otra opción para el transporte de hidrógeno líquido es a través de gaseoductos aislados que también incluiría un cable superconductor. El principal problema con el transporte de hidrógeno líquido sería la especialización en las necesidades de aislamiento y las pérdidas de bombeo y reenfriamiento del hidrógeno líquido durante el camino.

3.12.2. Transporte en estado gaseoso

La distribución de hidrógeno en gas presurizado se presenta muy interesante para el mercado masivo de vehículos privados, que podría recurrir a hidrogeneras (estaciones de servicio) que suministren el hidrógeno presurizado, sirviéndolo licuado y encartuchado para motocicletas. Para aplicaciones estacionarias en el sector residencial–comercial (menos de 200 kWe) y generación distribuida (más de 200 kWe) podría resultar rentable recurrir a canalizaciones, similares a las actuales de gas natural. Para aplicaciones de vehículos de mucho uso y en aviación el hidrógeno comprimido se podría servir en tanques.

Otro aspecto adicional a la distribución de hidrógeno es como se suministra a las hidrogeneras, si en forma canalizada, o mediante camiones en forma comprimida. Cuando se transportan grandes volúmenes, la distribución por vía de gaseoductos es actualmente la opción más económica.

Utilizar los gaseoductos de gas natural para distribuir hidrógeno es una opción que está siendo evaluada para reducir las inversiones necesarias. Puede ser posible mezclar hasta un 30 % de hidrógeno con gas natural en los gaseoductos existentes de gas natural sin modificaciones en la infraestructura del gaseoducto. Este método necesitaría de un proceso de separación en el punto de consumo.

El hidrógeno se suministra hoy en día mediante tuberías en varias áreas industriales de los Estados Unidos, Canadá, y Europa. Las presiones de funcionamiento típicas están entre 10 y 30 bar, con caudales entre 310 y 8 900 kg/h.

Por ejemplo, Alemania dispone una tubería de 210 km que funciona desde 1939, llevando 8 900 kg/h de hidrógeno operando a presiones de 20 bar. La tubería más larga de suministro de hidrógeno del mundo es propiedad de *Air Liquide*, con una longitud de 400 km y conecta el norte de Francia con Bélgica. En Estados Unidos hay más de 720 km de tuberías de hidrógeno concentradas a lo largo de la costa del Golfo y la región de los Grandes Lagos.

Por otro lado, si el transporte se realiza por carretera se utilizan cilindros a alta presión, camiones cisterna o gaseoducto. El hidrógeno debe ser comprimido a alta presión para maximizar la capacidad de los tanques.

Los cilindros de gas a alta presión llevan el gas comprimido hasta 400 bar y almacenan alrededor de 1,8 kg de hidrógeno, pero el costo de manejarlos y transportarlos es muy elevado.

También analizan alternativas de producción *in-situ*, a partir de combustibles fósiles, especialmente gas natural, en una primera fase de transición, lo que permitiría aprovechar muchas de las infraestructuras existentes. Parece claro que el problema no presenta una solución única, sino que habrá que buscar la solución más adecuada acorde con el contexto tecnológico, económico y social.

3.13. Purificación catalítica

Existe una gran variedad de procesos y métodos para la producción de hidrógeno, algunos de los cuales son capaces de producir hidrógeno de gran pureza. No obstante, otros muchos producen subproductos que hacen que el gas obtenido no sea solamente hidrógeno, algo indispensable para algunas aplicaciones como por ejemplo las pilas de hidrógeno, muchas de las cuales

son poco tolerantes a las impurezas. Existen métodos diferentes para la purificación del hidrógeno que, en numerosas ocasiones, se utilizan conjuntamente para obtener una mayor eficacia.

Con los subproductos no deseados producidos con la mayoría de los procesos catalíticos, es posible el uso de reacciones de desplazamiento de gas de agua, para obtener más hidrógeno, mejorando así su eficiencia y producción de hidrógeno, al mismo tiempo que se elimina una parte de los productos no deseados.

No obstante, se requiere una segunda etapa de reacciones catalíticas de oxidación selectiva con oxígeno de CO a baja temperatura, en la cual es muy importante la selección de un buen catalizador que no reaccione con el hidrógeno para producir agua. Esto para eliminar las impurezas restantes que la reacción de desplazamiento no ha podido eliminar por completo o que tan solo ha transformado.

Para eliminar las impurezas de metano, por ejemplo, los catalizadores empleados suelen contener nanopartículas de paladio sobre un soporte de alúmina. En cambio, para oxidación del monóxido de carbono se suelen utilizar óxidos de diversos metales (estaño o cerio) mezclados con nanopartículas de otros metales (platino o rodio).

3.14. Separación

Existen tres métodos que permiten separar el hidrógeno de mezclas de gases de manera más eficaz que la oxidación selectiva, ya que el método de purificación catalítica, a pesar de que permite obtener algo más que hidrógeno en diversos procesos de producción, presenta dificultades para eliminar por

completo todas las impurezas de una mezcla de gases sin hacer reaccionar también algún átomo de hidrógeno que se perdiera.

3.14.1. Separación mediante adsorción

Este método se basa en la capacidad de determinados adsorbentes para capturar impurezas. El proceso consiste en ciclos de dos etapas:

- Etapa de alta presión: se realiza a presiones entre 15 y 30 bar y las impurezas son retenidas por el adsorbente.
- Etapa a presión atmosférica: las partículas se desorben.

A diferencia de las impurezas, el hidrógeno raramente es adsorbido, con lo que tras varios ciclos se obtiene hidrógeno puro. La capacidad de o intensidad de adsorción sigue aproximadamente la siguiente secuencia:



La principal ventaja de este método es que cuantos más ciclos se realicen, mayor será la pureza del hidrógeno obtenido, pudiendo llegar a purezas entre 99 y 99,999 % en vol. Con tan solo entre 1 y 10 ppm de CO.

3.14.2. Separación mediante membranas

Este método consiste en separar los diferentes componentes del gas a purificar según su capacidad de atravesar una membrana. En el caso del hidrógeno se utilizan tanto membranas poliméricas como membranas metálicas, consiguiendo una mayor cantidad de hidrógeno que la recuperada por los métodos de adsorción. Estas membranas suelen tener forma laminar o tubular y

un grosor de milésimas de milímetro, y en el caso de las membranas poliméricas suelen ir unidas a un sustrato poroso para facilitar su manipulación.

Las membranas metálicas aprovechan la capacidad de adsorber hidrógeno de algunos metales como el paladio. Con esto al, aplicar una cierta presión, se consigue que el hidrógeno atraviese la membrana, mientras que otros elementos no lo logran.

Estos sistemas permite obtener purezas mayores del 99,9999 %, pero su principal inconveniente es que las membranas son dispositivos caros y sumamente delicados que deben soportar. En algunos casos, presiones y temperaturas elevadas, por lo que se deben sustituir periódicamente a causa de defectos producidos por estas condiciones, a pesar del desarrollo de membranas más resistentes.

3.14.3. Separación criogénica

En este caso, la separación se produce a causa de las diferentes temperaturas de ebullición de las impurezas presentes en el hidrógeno. Así pues, la temperatura de ebullición del hidrógeno es -258.8 °C, por lo que enfriando los gases a temperaturas algo superiores a estas se consigue que las impurezas condensen o solidifiquen, mientras el hidrógeno permanece en estado gaseoso.

Aunque este método es el más efectivo tiene un costo energético elevado a causa de las temperaturas necesarias para llevarlo a cabo.

3.15. Medidas de seguridad

La seguridad de hidrógeno cubre la producción, manejo y uso seguro del hidrógeno. El hidrógeno presenta desafíos únicos debido a la facilidad con que se producen fugas, ignición a baja energía, amplia variedad de mezclas aire-combustible, flotabilidad y su habilidad para debilitar metales lo que se debe considerar para asegurar operaciones seguras. El hidrógeno líquido posee desafíos adicionales debido al aumento de su densidad y temperaturas extremadamente bajas que se necesitan para mantenerlo en estado líquido.

El hidrógeno es usado como una materia prima en procesos industriales incluyendo la producción de amonio y metanol, y la refrigeración de generadores eléctricos en centrales de generación de energía eléctrica.

Aunque el hidrógeno tiene muchas propiedades útiles, algunas tienen serias implicancias de seguridad como por ejemplo:

- No tiene color, sabor u olor.
- Es extremadamente reactivo con el oxígeno y otros oxidantes.
- Baja energía de ignición.
- Alta temperatura de la flama.
- Flama invisible en condiciones de luz diurna.
- Coeficiente *Joule-Thomson* negativo; el gas fugado se calienta a sí mismo y puede encenderse solo.
- El pequeño tamaño molecular promueve las fugas y la difusión.
- Muy amplio rango entre los límites inferiores y superiores de la inflamabilidad en las mezclas con aire.
- Velocidad de flama muy alta.

- Se puede difundir en y reaccionar con ciertos metales, el hidrógeno los vuelve frágiles.
- El líquido criogénico a 20 K es incluso más frío que el nitrógeno, oxígeno o argón congelados.
- Puede asfixiar.

Por otra parte, el contexto de la seguridad, el hidrógeno es considerablemente flotable y la carencia de toxicidad, aparte de la de asfixiar.

Los reglamentos y estándares para el hidrógeno son reglamentos y estándares aplicables a los vehículos de celda de combustible, aplicaciones de celdas de combustible estacionarias y estáticas de hidrógeno. Adicional a los reglamentos y estándares para los productos de las tecnologías de hidrógeno, existen reglamentos y estándares para la seguridad del hidrógeno, es decir para el manejo seguro del hidrógeno y almacenamiento. Diversas asociaciones han publicado estándares para la instalación de sistemas de celdas de combustible estacionarias.

Los actuales estándares de la ANSI/AIAA para las directrices de seguridad de hidrógeno es el AIAA G-095-2004, *Guía para la Seguridad de Hidrógeno y Sistema de Hidrógeno*. Como la NASA es uno de los más grandes consumidores de hidrógeno del mundo, estas evolucionaron a partir de las directrices iniciales de la NASA, la NSS 1740.16. Estos documentos cubren tanto los riesgos provocados por el hidrógeno en sus diferentes formas como las formas de disminuirlos.

3.15.1. Fugas de hidrógeno

El hidrógeno se acumula bajo los techos y voladizos, donde se transforma en un peligro de explosión. Cualquier edificación que contenga una fuente potencial de hidrógeno debería tener buena ventilación, fuertes sistemas de supresión de ignición. Esto para todos los dispositivos eléctricos y preferiblemente debe estar diseñada para tener un techo que puede ser volado en forma segura del resto de la estructura en caso de una explosión.

El hidrógeno también puede entrar a las tuberías y puede seguir las hasta sus destinos. Las tuberías con hidrógeno deberían estar localizadas por sobre otras para prevenir que esto ocurra. Sensores de hidrógeno permiten una rápida detección de fugas de hidrógeno para asegurar que el hidrógeno sea ventilado y la fuente pueda ser ubicada.

Al igual que en el caso del gas natural se puede agregar un odorante a las fuentes de hidrógeno para permitir la detección de fugas por el olor. Mientras que las llamas del hidrógeno son difíciles de visualizar con el ojo, ellas son fácilmente visibles con detectores de llama ultravioletas o infrarrojos.

3.15.2. Evitar atmósferas explosivas

Es posible evitar la acumulación de una atmósfera explosiva en las zonas aledañas a las instalaciones de hidrógeno. Esto por medio de la construcción de plantas de hidrógeno con áreas bien ventiladas, asegurándose que las plantas se encuentren a prueba de fugas y permanezcan de esa manera.

Las instalaciones de hidrógeno tratarán de ser instaladas en el exterior, para que el escape de hidrógeno pueda escapar a la atmósfera sin peligro. Si

esto no es posible el recipiente de almacenamiento de hidrógeno debe estar instalado afuera. Las líneas de escape de las válvulas de seguridad o bombas de vacío, deben dar al exterior. Las aberturas de escape no se encontrarán bajo salientes, en las aberturas de los edificios o en las proximidades de un área de admisión de aire. Las aberturas de escape deben estar claramente marcadas para que en caso de trabajos en caliente en los alrededores, todo el mundo sea consciente de las precauciones necesarias que deben tomar.

Las salas con instalaciones de hidrógeno tendrán una efectiva ventilación natural o forzada. El contenido de hidrógeno en la sala puede ser controlado a través de un sistema de alerta (explosímetro).

Se debe prestar especial atención a las salas muy pequeñas, como por ejemplo habitáculos de instalaciones de mezclas de gas o aparatos de medición de hidrógeno. Las partes en este tipo de habitáculos que contienen hidrógeno tienen que ser definitivamente a prueba de fugas, por ejemplo mediante el uso de conexiones permanentes de la tubería. El habitáculo debe estar equipado con aberturas de ventilación para que el hidrógeno pueda escapar.

Las conexiones de las tuberías en las instalaciones de hidrógeno, siempre que sea posible, estarán de forma permanente soldadas, porque esto asegura estanqueidad de larga duración. Esta recomendación es especialmente seguro para las tuberías de hidrógeno instaladas bajo la tierra o en zonas no accesibles, como por ejemplo un canal.

Cuando los tubos, que pueden ser separados, están conectados con accesorios roscados o bridás, se utilizará equipos a prueba de fugas. En conexiones de las tuberías que están roscadas se debe usar accesorios de compresión. Comprobación de fugas en las instalaciones de hidrógeno primero

se debe hacer con un gas no inflamable, como el nitrógeno o el helio. Solo después de que las fugas evidentes han sido reparadas, una segunda prueba de fugas se debe hacer con el uso de hidrógeno a una presión de trabajo.

Una instalación de hidrógeno con las fugas se sabe que no es segura. La instalación tiene que ser despresurizada, purgada y reparada.

Tener una mezcla explosiva en una instalación de hidrógeno no es aceptable. Estas mezclas son fácilmente inflamables, por ejemplo, mediante calor de fricción al operar una válvula o por medio de partículas de óxido que han sido transportadas. Incluso el calentamiento del gas que ha sido causado por el choque de presión de flujo rápido de hidrógeno, dentro de una sección llena de aire de la instalación puede causar ignición

El aire y el oxígeno tienen que mantenerse lejos de instalaciones de hidrógeno. Esto es posible si la instalación no tiene relación con aire o el oxígeno que contienen los sistemas. Si las conexiones existen, por ejemplo en equipos de soldadura que funciona con hidrógeno y oxígeno, tienen que ser instaladas válvulas de retención para asegurarse que no es posible para uno de los gases de entrar en la línea del otro.

Los compresores de hidrógeno deben estar equipados con alarma de baja presión de succión y alarma de oxígeno, para asegurar que no se puede crear una mezcla explosiva de hidrógeno y oxígeno.

Si el hidrógeno se combina con el aire o el oxígeno para un proceso técnico especial, solo se hará bajo los requisitos previos supervisados muy de cerca manteniendo la correcta concentración y la presión máxima admisible y la ausencia de fuentes de chispa.

Antes poner en funcionamiento las instalaciones de hidrógeno, el aire tiene que ser eliminado, por ejemplo, mediante el bombeo de vacío o purga. El método más seguro es purgar con nitrógeno, si el contenido de oxígeno en la instalación es del 1 % en vol. Si es una mezcla combustible de argón-hidrógeno o mezclas de gases que se utilizan para la soldadura de los envases, el aire también tiene que ser eliminado a través de la purga con el fin de evitar una explosión en el contenedor.

También cuando se cierre, la instalación de hidrógeno tiene que ser purgada de hidrógeno a través de bombeo de vacío o purga. El contenido de hidrógeno tiene que ser reducido al 1 % vol. antes de la instalación se abra. Si, cuando cierre la instalación, partes de esta siguen estando bajo presión. El hidrógeno tiene que ser cuidadosamente retirado de la parte que se encuentra bajo presión, por ejemplo a través de un doble bloqueo con una válvula de purga, desconexión y otros.

En todos los procesos de depuración, es importante recordar, que la purga de gas seguirá el camino de menos resistencia. Por lo tanto se debe prestar especial atención a las vías muertas. Puede ser necesario ver si todas las válvulas han asumido el control de posición necesario. Hay que tener cuidado especial con las válvulas, ya que se corre el riesgo de que parezcan estar abiertas y no permitan el paso de hidrógeno, y con las válvulas que están cerradas y no siempre son a prueba de fugas.

3.15.3. Evitar ignición por fuentes externas

La planta de producción de hidrógeno y sus instalaciones incluyendo los alrededores se clasificarán para el riesgo de atmosferas explosivas, bajo la Norma DIN EN 1127-1, DIN EN 60079-10 u otras regulaciones relevantes. La

clasificación sirve de orientación sobre las precauciones necesarias para evitar la ignición. Sin embargo, el consejo general debe considerar lo siguiente:

- Los equipos eléctricos no se utilizarán o bien serán instalados si no se dispone de su clasificación de uso para atmósferas explosivas.
- Trabajar con fuego (soldadura, corte, molienda) solo está permitido si el área de trabajo está libre de hidrógeno. Esto debe ser verificado con explosímetro, en ningún caso con una llama abierta. Al realizar el trabajo con el fuego es importante tener en cuenta, que la soldadura y las chispas pueden volar hasta a 10 metros del lugar de origen.
- Los trabajos de ensamblaje no están permitidos cuando el hidrógeno se está fugando, porque incluso cuando se utilizan herramientas libres de chispa, todavía hay un riesgo de ignición.

3.15.4. Reaccionar ante fugas de hidrógeno

Si el hidrógeno se está escapando sin intención, el suministro de gas tiene que ser cortado por el cierre de los controles necesarios. No debe ser intentado reparar la fuga mientras que el hidrógeno se escapa, por el peligro de una ignición. Si una gran cantidad de hidrógeno ha fugado a la atmósfera existe un grave peligro de una explosión. El personal tiene que salir de la sala, que luego tiene que estar muy bien ventilada. Con el fin de probar la efectividad de la ventilación, un chequeo de medición debe llevarse a cabo.

Si el escape de hidrógeno se ha prendido fuego puede ser extinguido por el cierre de las líneas de suministro de hidrógeno. Si esto no funciona, no intente apagar el fuego en las salas con los agentes de extinción debido a que

el flujo continuo de hidrógeno presenta un riesgo de explosión. En tal caso, uno tiene que dejar que el fuego se consuma hasta que el hidrógeno se queme y luego se apague por su cuenta. Puede que sea necesario refrigerar las áreas con agua fresca que podría estar en peligro por el fuego (ejemplos, los cilindros de gas). Cuando el proceso de combustión está casi terminado, la instalación afectada se debe purgar con nitrógeno para asegurar que no hay retroceso en el interior.

3.15.5. Almacenamiento seguro de los tanques

Regulaciones internacionales contienen diversos requisitos en la manipulación de cilindros de gas. También se debe tener en cuenta la manipulación de cilindros y bloques de hidrógeno: las válvulas de los cilindros y bloques solo se abren cuando el reductor de presión, con juntas en buen estado, ha sido cuidadosamente conectados. Los puntos de conexión deben ser evaluados para verificar que no haya fugas. Las válvulas del cilindro y el bloque se cierran cuando no estén en uso con el fin de evitar la fuga de gas en las conexiones.

Si la válvula del cilindro o bloque tiene una fuga o cuando el escape de hidrógeno no se detiene mediante el cierre de la válvula, el contenedor de hidrógeno no se detiene mediante el cierre de la válvula, el contenedor de hidrógeno tiene que ser transportado fuera donde se vacié. Las reparaciones de cilindros de hidrógeno o bloques, así como las válvulas, solo pueden ser llevadas a cabo por el proveedor. El hidrógeno no se debe utilizar para llenar globos de juguete, debido al peligro de explosión, tampoco debe ser utilizado para llenar sistemas neumáticos, por ejemplo latas de pintura en aerosol o por procesos similares.

4. EL AGUA COMO UNA FUENTE DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO

4.1. Introducción

Como ya se ha visto se usa el agua como materia prima para la producción de hidrógeno por medio de electrolisis. En la electrólisis se utiliza la electricidad para descomponer el agua en sus componentes elementales: hidrógeno y oxígeno. La electrólisis es uno de los métodos más limpios para la producción de hidrógeno debido a que es el único proceso que no necesita de combustibles fósiles.

El elemento primario de la electrólisis se conoce como electrolizador. Un electrolizador es una serie de celdas cada una con un electrodo positivo y otro negativo. Los electrodos están inmersos en agua que se ha hecho eléctricamente conductiva, por la adición de iones de hidrógeno, generalmente en forma de hidróxido de sodio, hidróxido de potasio y carbonato de potasio como elementos electrolíticos.

4.2. El uso de agua sin tratamiento

Para el proceso de la electrólisis el agua común no es útil por si sola ya que es necesario utilizar agua libre de aniones como el carbonato, fluoruro, cloruro y otros. Estas sales no permiten la formación de iones necesarios para el proceso, restándoles electroconductividad al agua. Para usar el electrolizador se necesita agua desmineralizada o destilada, debido a que si no se usa este tipo de agua el electrolizador no solo separará el oxígeno y el hidrógeno, sino

los demás componentes que estén presentes como los aniones mencionados y los cationes como el sodio, calcio, hierro y cobre. El agua común aumenta el consumo de corriente eléctrica que pasa a través de las celdas del electrolizador, aumentando los costos de producción por concepto de energía y vuelve ineficiente el proceso.

4.2.1. Dureza

La dureza del agua se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes (iones de calcio, estroncio, bario y magnesio en forma de carbonatos y bicarbonatos) y se expresa en equivalentes de carbonato de calcio y constituye un parámetro muy significativo en la calidad del agua.

De acuerdo con a la concentración de carbonatos contenidos en el agua, esta puede clasificarse en niveles de dureza, la tabla XVII indica las cantidades de sales.

Tabla XVII. **Índices de dureza del agua**

Denominación	ppm de CaCO ₃
Muy suaves	0 – 15
Suaves	16 – 75
Medias	76 – 150
Duras	150 – 300
Muy duras	Mayor a 300

Fuente: PALACIOS, Jorge. *El agua y sus aplicaciones para la industria.* p. 12.

Para el proceso de电解sis se debe utilizar agua muy suave (0–5 ppm). Esto deja un agua libre de carbonatos de calcio el cual no dañará el equipo y permitirá que el agua sea más electroconductiva.

4.2.2. Alcalinidad

La alcalinidad del agua se puede definir como una medida de su capacidad para neutralizar los ácidos. En las aguas comunes o naturales, esta propiedad se debe principalmente a la presencia de ciertas sales de ácidos débiles, aunque también puede contribuir la presencia de bases débiles y fuertes.

En general, en las aguas naturales, los compuestos que más contribuyen a la alcalinidad son los bicarbonatos. Puesto que se forman fácilmente por la acción del dióxido de carbono atmosférico sobre los materiales constitutivos de los suelos en presencia de agua, a través de la siguiente reacción:



Es decir que las aguas adquieren su alcalinidad por medio de la disolución de minerales básicos carbonatados, los que además aportan sus cationes mayoritarios como: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+).

En general podría decirse que en promedio el 80 % de la alcalinidad de un agua natural proviene de la disolución de rocas carbonatadas, en tanto que el 20 % restante se origina por la meteorización de alúmino-silicatos.

4.2.3. Acidez

No se puede hablar de la acidez del agua sin antes hablar de pH. El pH es una forma de expresar los iones de hidrógeno (H^+) o más exactamente de su actividad. Se usa universalmente para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o alcalinas de una solución.

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad \text{pH} = \log 1/[\text{H}^+]$$

Concentraciones excesivas de hidrógeno H⁺ afectan el agua en algunos de sus usos y por esta razón es una medida de polución de potencia. El pH es el que controla el grado de disociación de muchas sustancias. No debe confundirse con la acidez o la alcalinidad.

La presencia de carbonatos, fosfatos y de iones similares dan al agua un poder bufferizante y entonces la adición al agua de un ácido o de una base en tales condiciones no causa mayor efecto en el pH.

Entonces la acidez del agua se define como la capacidad que tiene esa agua de donar protones.

4.2.4. Minerales

Existen biomoléculas inorgánicas como las sales minerales. En función de su solubilidad en agua se distinguen dos tipos: insolubles y solubles en agua.

Las insolubles: forman estructuras sólidas, que suelen tener una función protectora como:

- Esqueleto: en el que encontramos: fosfatos, cloruros, y carbonatos de calcio.
- Caparazones: de carbonato cálcico de crustáceos y moluscos.
- Endurecimiento: como en gramíneas (impregnación con sílice).
- Otolitos: formados por cristales de carbonato cálcico.

Las solubles en agua se encuentran disociadas en sus iones (cationes y aniones) que son los responsables de su actividad biológica. Y desempeñan las siguientes funciones.

- Funciones catalíticas: algunos iones, como el cobre (Cu^+), manganeso (Mn^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y zinc (Zn^+) actúan como cofactores enzimáticos.
- Funciones osmóticas: los iones de sodio, potasio, cloro y calcio, participan en la generación de gradientes electroquímicos.
- Función tamponadora: se lleva a cabo por los sistemas carbonato–bicarbonato, y también por el monofosfato–bifosfato.

4.2.5. Conductividad

La conductividad específica del agua es la medida de la habilidad para transportar una corriente eléctrica, varía con el tipo y cantidad de iones que contenga.

Cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad. Por ello el valor de la conductividad es muy usado en el análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos

El agua pura es un buen conductor de la electricidad. El agua destilada ordinaria en equilibrio con el dióxido de carbono en el aire tiene una conductividad aproximadamente de $10 \times 10^{-6} W^{-1} * m^{-1}$ (20 dS/m). Debido a que la corriente eléctrica se transporta por medio de iones en solución, la conductividad aumenta cuando incrementa la concentración de iones.

Conductividad en distintos tipos de aguas:

- Agua ultra pura: $5,5 \times 10^{-6}$ S/m
- Agua potable: 0,005 – 0,05 S/m
- Agua del mar (35 g/l de sal): 5 S/m

4.2.6. Sólidos en suspensión

Son partículas que permanecen en suspensión en el agua debido al movimiento del líquido o debido a que la densidad de la partícula es menor o igual que la del agua. La concentración de sólidos en suspensión es un valor utilizado como uno de los indicadores de la calidad del agua.

Todos los sólidos en suspensión se pueden eliminar del agua mediante el filtrado. Sin embargo, si los sólidos en suspensión tienen una densidad mayor que el agua, estas partículas se pueden eliminar también por sedimentación, si la turbulencia del agua es mínima.

Los sólidos en suspensión pueden ser de origen orgánico o inorgánico. Los materiales orgánicos tienen origen animal o vegetal. Las sustancias orgánicas siempre contienen carbono, oxígeno e hidrógeno. Las sustancias inorgánicas tienen, por otro lado, origen mineral y no suelen contener carbono.

Los sólidos disueltos se aplican a las aguas que tienen materia suspendida y coloidal que interfiere con el paso de la luz a través del agua. Es una medida de la reducción de intensidad de la luz que pasa a través del agua.

Su origen puede ser debido a óxidos de hierro, óxidos de zinc, coloides, sólidos suspendidos. La mayoría provienen de arcillas de los suelos que

conforman los lechos de los ríos. Entre algunas arcillas se encuentran las caolinitas, bentonita, ilita, moscovita y otros.

4.2.7. Sólidos disueltos

TDS (Total Dissolved Solids) es una medida del contenido combinado de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido en forma molecular, ionizada o en forma de suspensión microgranular (coloide). En general, la definición operativa es que los sólidos deben ser lo suficientemente pequeño como para sobrevivir a través de un filtro con poros de 2 micrómetros (o más pequeños).

El total de sólidos disueltos se diferencia del total de sólidos en suspensión TSS, ya que este último se compone de sustancias que no pueden pasar a través de un filtro de dos micrómetros, aunque estas sean también suspendidas indefinidamente en una solución líquida. El término sólidos sedimentables se refiere a materiales de cualquier tamaño que no se mantienen suspendidos o disueltos en un tanque de retención que no está sujeto a movimiento, y por lo tanto excluye TDS y TSS. Sólidos sedimentables pueden incluir partículas grandes o moléculas insolubles.

La electroconductividad es realmente una medida de la actividad iónica de una solución en términos de su capacidad para transmitir corriente. En soluciones en dilución, los sólidos disueltos y la electroconductividad son comparables con el total de sólidos disueltos en una muestra de agua basado en medida de la electroconductividad calculados mediante la siguiente ecuación:

$$\text{TDS (mg/l)} = 0,5 * \text{electroconductividad (dS/m)}$$

Esta relación también se puede usar para determinar la aceptabilidad de un análisis químico del agua. No se aplica en aguas residuales crudas sin ningún tratamiento o en aguas residuales industriales con amplia contaminación. Esto es porque, cuando la solución está más concentrada ($TDS > 1\ 000 \text{mg/l}$, electroconductividad $> 2\ 000 \text{ ms/cm}$), la proximidad de los iones en solución entre ellos inhibe su actividad y en consecuencia su habilidad de transmitir corriente, a pesar de que la concentración física de sólidos disueltos no queda afectada. A amplios valores de TDS, la relación de TDS/electroconductividad aumenta y la relación tiene a ser en torno a $TDS = 0,9 * \text{electroconductividad}$.

4.3. El uso de agua destilada

Es aquella sustancia cuya composición se basa en la unidad de moléculas de H_2O y ha sido purificada mediante destilación. El agua destilada por si sola es mala conductora de la electricidad porque le han sido retiradas todas las sales necesarias para el proceso de electrolisis, para esto es necesario agregarle un electrolito.

4.4. El uso de agua desmineralizada

Es el agua a la cual se le han quitado los cationes, como los de sodio, calcio, hierro y los aniones como el carbonato, fluoruro, cloruro y otros. Mediante un proceso de intercambio iónico. Esto significa que al agua se le han quitado todos los iones excepto el H^+ , o más rigurosamente H_3O^+ y el OH^- , pero puede contener pequeña cantidades de impurezas no iónicas como compuestos orgánicos.

El agua desmineralizada es parecida al agua destilada en el sentido de su utilidad para experimentos científicos, por ejemplo en el área de la química analítica donde se necesitan aguas puras libres de iones interferentes. El agua desmineralizada tiene valores típicos de resistividad de $18,2 \text{ M}\Omega\text{-cm}$, o su inversa, la conductividad, de $0,055 \mu\text{S}\text{-cm}^{-1}$.

El agua desmineralizada puede cambiar su pH con facilidad al ser almacenada, debido a que absorbe el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico. Este, al disolverse, forma ácido carbónico, de ahí el aumento de la acidez, que puede ser eliminada hirviendo el agua. El agua desmineralizada es bastante agresiva con los metales, incluso con el acero inoxidable, por lo tanto debe utilizarse plástico o vidrio para su almacenaje y manejo.

4.4.1. Cationes

Un catión es unión con carga eléctrica positiva (+), es decir, que ha perdido electrones. Los cationes se describen con un estado de oxidación positivo. En términos químicos, es cuando un átomo neutro pierde uno o más electrones de su dotación original, este fenómeno se conoce como ionización.

Las sales típicamente están formadas por cationes y aniones (aunque el enlace nunca es puramente iónico, siempre hay una contribución covalente). También los cationes están presentes en el organismo en elementos tales como el sodio (Na) y el potasio (K) en forma de sales ionizadas. Por ejemplo el catión (K^+) es un potasio que perdió un electrón para quedar isoeléctrico con el argón. El magnesio (Mg^{2+}) es un MG que perdió 2 electrones para quedar isoeléctrico con el neón.

4.4.2. Aniones

Un anión es un átomo con carga eléctrica negativa, es decir un ion negativo. En los aniones simples, esta carga negativa está dada por la afinidad del átomo neutro por los electrones. Por ejemplo el átomo de cloro, que tiene en su envoltura más externa siete electrones.

El cloro tiene gran facilidad para ganar un electrón más y así completar su capa externa, quedando mucho más estable, y con una carga negativa. Este electrón ganado es cedido por otro átomo, que tiene facilidad para ceder electrones, como por ejemplo el átomo de sodio, que al ceder su electrón se transforma en catión (ion con carga eléctrica positiva).

Dentro de los aniones simples o monoatómicos más comunes estan:

- Ion hidruro H⁻
- Ion cloruro Cl⁻
- Ion sulfuro S²⁻
- Ion nitruro N³⁻
- Ion fluoruro F⁻

4.4.3. Uso de hidróxido de sodio como elemento electrolítico

El hidróxido de sodio (NaOH) también conocido como soda caustica es un hidróxido caustico usado en la industria (principalmente como base química). A temperatura ambiente, el hidróxido de sodio es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe la humedad del aire (higroscópico). Es una sustancia manufacturada. Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera gran cantidad de calor que puede ser suficiente como para encender materiales

combustibles. El hidróxido de sodio es muy corrosivo. Generalmente se usa en forma sólida o como una solución de 50 %.

Como parte de la electrolisis es necesario el uso de un electrolito sólido que se mezclará con agua destilada o desmineralizada para diluirlo y así hacerla conductora, de manera que se obtenga un producto con las mínimas impurezas posibles, al mismo tiempo que permita un buen flujo de corriente eléctrica a través suyo. No obstante, el electrolito escogido no debe originar nuevos componentes en las reacciones que se den en la celda, tan solo facilitar la división de las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno.

La conductividad del electrolito líquido que se tenga vendrá determinada por la concentración de la disolución y por el producto usado. Por tanto, es recomendable determinar la cantidad necesaria de manera práctica para así observar la variación que experimenta la intensidad de corriente que circula por nuestra celda en función de la concentración de la disolución.

Para el hidróxido de sodio la medida recomendada es de 3 g/lit. No es recomendable utilizar el hidróxido de sodio que venden en las ferreterías para destapar cañerías obstruidas. Es mejor usar el que venden en las droguerías o ventas de químicos. El uso de hidróxido de sodio deja la celda sucia, genera un residuo marrón que enturbia la disolución, reduciendo progresivamente la eficiencia de la celda si esta no se limpia.

4.4.4. Uso de hidróxido de potasio como elemento electrolítico

También conocido como potasa caustica. Es un compuesto químico inorgánico de formula KOH, tanto el hidróxido de potasio como el hidróxido de

sodio, son bases fuertes de uso común. Tiene muchos usos industriales como comerciales. La mayoría de las aplicaciones explotan su reactividad con ácidos y su corrosividad natural. Su disolución en agua es altamente exotérmica, con lo que la temperatura de la disolución aumenta, llegando incluso, a veces, al punto de ebullición. El hidróxido de potasio (KOH) es especialmente significativo por ser el precursor de la mayoría de jabones suaves y líquidos, así como por estar presente en numerosos compuestos químicos que contienen potasio.

En general, el hidróxido de potasio es el mejor elemento electrolítico para cualquier aplicación, ya que es el que soporta condiciones más variadas y no deja residuos. El ácido sulfúrico es otra opción, que aunque queda limitadas para celdas de poca potencia. No obstante, si se decide su uso, es importante que se haga en concentraciones muy bajas.

En general, se debe tener especial precaución a la hora de trabajar con cualquiera de estos productos, incluso una vez se encuentran diluidos, ya que la mayoría son ácidos o bases fuertes y corrosivos. Es importante también que los materiales utilizados en la construcción de las diferentes partes de la celda sean capaces de soportar esta corrosión.

Tabla XVIII. Diferentes electrolitos y sus características

Producto	Fórmula	Voltaje	Amperaje	Temperatura
Sulfato de magnesio	MgSO ₄	Indiferente	Bajo	Baja
Hidróxido de potasio	KOH	Indiferente	Alto	Alta
Hidróxido de sodio	NaOH	Indiferente	Alto	Media
Sulfato de sodio	NaSO ₄	Bajo	Bajo	Media
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	Bajo	Medio	Media

Fuente: FRANCO, Daniel. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas*. p. 121.

4.4.5. El uso de carbonato de potasio como elemento electrolítico

El carbonato de potasio es una sal blanca soluble en agua, de fórmula química K_2CO_3 . Forma soluciones alcalinas fuertes, o lo que es lo mismo, es una sal básica. Se suele formar como producto de la reacción química entre el hidróxido de potasio (KOH) y el dióxido de carbono (CO_2). Además es una sustancia higroscópica, que aparece a menudo como un sólido de base de agua.

Un buen electrolito podría ser la mezcla de 20 g de carbonato de potasio (K_2CO_3) más 5 g de hidróxido de sodio ($NaOH$) en una disolución con agua destilada o desmineralizada, como se mencionó no es ideal comprar estos productos en ferreterías.

4.5. Propuesta de diseño de la celda de generación de hidrógeno

La celda de generación también conocida como electrolizador tiene como tarea el proceso de separación de los elementos de un compuesto por medio de la electricidad. En ella ocurre la captura de electrones por los cationes en el cátodo (una reducción) y la liberación de electrones por los aniones en el ánodo (una oxidación).

En el electrolizador se aplica una corriente eléctrica continua mediante un par de electrodos conectados a una fuente de alimentación eléctrica de voltaje continuo y sumergidos en la disolución. El electrodo conectado al polo positivo (+) se conoce como ánodo. Este separa las partículas de hidrógeno, y el conectado al negativo (-) como cátodo separando los átomos de oxígeno.

Cada electrodo atrae iones de carga opuesta. Así los iones negativos, o aniones, son atraídos y se desplazan hacia el ánodo (electrodo positivo), mientras que los iones positivos, o cationes, son atraídos y se desplazan hacia el cátodo (electrodo negativo). En los electrodos se produce una transferencia de electrones entre estos y los iones, produciéndose nuevas sustancias. Los iones negativos o aniones ceden electrones al ánodo y los iones positivos o cationes toman electrones del cátodo.

La celda ideal para el electrolizador sería una celda seca. Se le llama así porque el electrolito no se encuentra alrededor de los electrodos, sino entre ellos, y se almacena en un depósito separado de la celda.

Este diseño pretende aumentar la eficiencia del sistema mediante la reducción de fugas de corriente, que suelen producir en su mayoría por los bordes de los electrodos, al encontrar aquí el camino más fácil para circular, así pues, al evitar que los bordes de los electrodos toquen el electrolito, se consigue en reducir en gran medida las pérdidas.

4.6. Propuesta de materiales a utilizar para la construcción de la celda

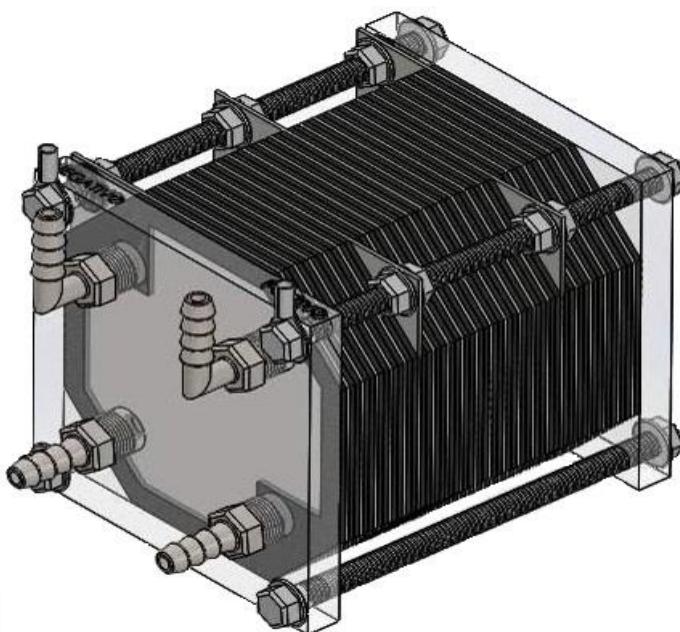
El mejor material para la fabricación de los electrodos, por sus propiedades eléctricas, es el níquel. No obstante, este presenta algunos problemas por la fragilización por hidrógeno, por lo que no es recomendable el uso aislado de este material, que además tiene un costo elevado. En su lugar se utiliza acero inoxidable, en algunos casos recubierto de níquel. De esta manera se obtienen unos electrodos con buenas propiedades eléctricas, así como resistentes a la fragilización y a la corrosión.

El mejor acero es el de grado 316 o 316 L, debido a su contenido de molibdeno entre el 2 y 3 % en su composición, esto previene la aparición de corrosión y aumenta su resistencia a la misma. Se refiere a menudo a este tipo de acero como el acero grado marino debido a su resistencia a la corrosión en cloruro. Esto en comparación con el grado 304, por lo que se ha convertido en un material muy adecuado para usarlo en ambientes cercanos al océano.

El acero grado 316 L es una variante del 316 que tiene un contenido de carbono inferior, menor límite elástico y también menor resistencia a la tracción. Ofrece en cambio mejor soldabilidad y menor probabilidad de aparición de corrosión entre las uniones.

Para los platos que sostienen las planchas de acero se utilizan un polímero de baja o alta densidad como PVC, ertalon, nylatron, silicona y otros.

Figura 31. **Electrolizador de celda seca**



Fuente: Universidad de Medellín. *Electrolizador*. Consulta: 20 de noviembre de 2014.

4.7. Cálculo de consumo de energía eléctrica para la producción

La energía necesaria para extraer el hidrógeno de un litro de agua se obtiene a partir de la energía de formación del agua líquida, a partir del hidrógeno y oxígeno moleculares que es de 285,8 kJ/mol. 18 g de agua conforman un mol; luego en un litro hay $1\ 000/18 = 55,56$ moles de agua por litro. Por tanto la energía necesaria para disociar un litro de agua en sus componentes oxígeno e hidrógeno es:

$$E = 55,56 \text{ moles} * 285,8 \text{ kJ} = 15\ 793,31 \text{ kJ}$$

Convirtiendo esta cantidad de energía expresada en Joule a kilowatt kW resultaría ser: $1 \text{ kW/h} = 3\ 600 \text{ J} = 4,39 \text{ kW/h}$

Se aplicará una potencia de 4,39 kW al proceso de electrolisis durante una hora, se disociaría completamente un litro de agua. Tras la disociación, $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}$, se obtienen dos moles de hidrógeno y un mol de oxígeno por cada dos moles de agua, por tanto de un litro de agua se obtienen:

$$27,78 \text{ moles de O} = 27,78 \times 32 = 888,9 \text{ g de O}$$

$$55,56 \text{ moles de H}_2 = 111,1 \text{ g de H}_2$$

La densidad de corriente (d_c) se define como la cantidad de corriente que circula por unidad de superficie de un electrodo, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$dc = \frac{Ic}{Se} = \frac{Ie}{n * Se} \text{ en } \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right]$$

Donde:

d_c = densidad de corriente

I_e = intensidad que circula a través del electrodo

n = número de agrupaciones de celdas

S_e = superficie del electrodo

Suponiendo una misma superficie de electrodo, en aumentar la corriente que circula por la celda, incrementa la producción de gas, pero también el voltaje necesario para hacer circular esta corriente, porque la eficiencia de la celda disminuirá. Para evitar esto, lo ideal es mantener un flujo de $1\ 000\ A/m^2$, ya que a menor área, se necesitará un mayor voltaje para hacer circular el mismo amperaje.

Para hacer más eficiente el electrolizador se implementa el uso de un sistema de alimentación por pulsos PWM (Pulse With Modulation). Esto es debido a que al inicio de cada pulso, suponiendo el mismo voltaje de alimentación, circula más corriente a través de la celda que con una alimentación continua.

Además, el uso de circuitos PWM permite limitar el flujo de corriente que pasa a través de una celda, y en muchos casos, también permiten regular el voltaje.

4.8. Análisis del comportamiento de la celda en funcionamiento

El electrolizador funciona entre los 65 y $85\ ^\circ C$ dependiendo de la corriente y el electrolito que se use. Los electrolizadores de hoy en día tienen una eficiencia entre un 50 y $80\ %$ cuando se consideran todas las condiciones (la

temperatura ambiente, presión atmosférica, la medición exacta del volumen de gas y corriente) cuando está funcionando con corrientes directas o PWM puede aumentar el rendimiento aún más, ya que es sabido que en el comienzo de cada pulso se obtienen mayores flujos de corriente a diferencia del estado estacionario.

La eficiencia de una celda se debe en gran parte a los materiales con los cuales está construida y el electrolito que se usa. Se podría decir que la电解质 aun es una tecnología, que en muchos sistemas, presentan rendimientos relativamente bajos.

Los electrolizadores PEM ofrecen rendimientos que oscilan entre el 65 y el 82 % y se presentan como una tecnología que se desarrollará lo suficientemente rápido como para ser implementada en un tiempo relativamente corto.

Uno de los avances tecnológicos es la generación de hidrógeno mediante电解质 del agua usando ánodos hechos de nanotubos de carbono que aumentan el rendimiento o, mejor dicho, reducen la energía necesaria para generar dicho hidrógeno.

Otra de las investigaciones que prometen mucho aumento de rendimiento se está produciendo en el INET (Institute of Nuclear and new Energy Technology) en China, por Yu bo, Zhang Wenqiang, Xu Jingming y Chen Jing.

Este nuevo avance promete rendimientos muy elevados a partir del uso de una técnica llamada electrolysis de vapor a alta temperatura aproximadamente a 1 200 °C.

5. MÉTODOS DE INTRODUCIR EL HIDRÓGENO AL MOTOR DE COMBUSTIÓN

5.1. Inyección del hidrógeno

Teniendo en cuenta sus ventajas, la manera que más rendimiento y aprovechamiento de hidrógeno proporciona es la inyección directa del hidrógeno en la cámara de combustión, mediante un inyector electrónico debidamente instalado.

Sin embargo, este tipo de inyección requiere de mayores modificaciones en el motor para funcionar, no siendo el más adecuado para maximizar la compatibilidad del sistema con el mayor número de buques.

El sistema más simple para la introducción del hidrógeno es mediante el enriquecimiento del aire con carburación, pero se descarta debido a que en cantidades como las que se requiere introducir en el motor resultan improductivas reduciendo el rendimiento térmico (reducciones de aproximadamente un 3 a 4 %).

Así pues, se determina que el sistema de inyección que deberá ir instalado en el circuito de alimentación de combustible del motor será la inyección en conducto o *Port Fuel Injection*, consiste en colocar un inyector un poco después del colector de admisión, anterior a la válvula de admisión. Mediante este sistema está comprobado que no se producen grandes aumentos de rendimiento (no superior al 6 %) pero se continúan obteniendo los beneficios medioambientales del uso de hidrógeno.

5.2. Elementos de control de inyección

Para controlar el flujo de hidrógeno a través del sistema se usan diversos dispositivos. Los elementos mecánicos más comunes para controlar este flujo son las válvulas de retención y los reguladores. Estos podrán ser controlados manualmente o remotamente mediante sistemas neumáticos o eléctricos.

Los actuadores deben estar diseñados de manera que no se conviertan en fuente de ignición del hidrógeno produciendo accidentes o combustiones no deseadas (como ejemplo, la corriente eléctrica de una electroválvula o inyector).

Las válvulas de retención evitarán que el flujo viaje en sentido contrario al deseado mientras que los reguladores controlan la presión de los fluidos en los sistemas. Las válvulas y sistemas de sobrepresión son muy importantes en un sistema de hidrógeno. Los sistemas para evitar esta presión suelen consistir en unas válvulas de distintas tipologías que se abren al recibir una fuerza superior a la presión.

Como requerimientos básicos en la prevención de una atmósfera explosiva se debe aplicar una doble barrera en las tuberías que conducen el hidrógeno, con el fin de no exponerlo a la atmósfera. El espacio entre la primera y la segunda barrera se define en función del peligro de explosión de la zona. Para definir esta segunda zona, libre de peligros por explosión o inflamación del hidrógeno, existen dos posibilidades. Una posibilidad es la instalación de tuberías de doble pared (tuberías concéntrica) y otra diferente son las tuberías simples, separadas mediante una pared o compartimento.

5.3. Introducción por sistema de carburación

Este método consiste en el enriquecimiento del aire mediante un carburador de Venturi para gas. Además de resultar el método más simple, es el que mejor permite pasar de un motor de combustión interna ciclo Otto (a gasolina) a un motor de hidrógeno.

Otra ventaja que supone emplear la carburación en un motor de combustión interna de hidrógeno es que no se requiere una presión de suministro de 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. Asimismo, a mayor cantidad de mezcla aire–hidrógeno dentro del conducto de admisión agrava los efectos del preencendido. Existe retroceso de llama debido a la baja densidad del hidrógeno y su baja energía de ignición.

5.4. Introducción por sistema de inyección indirecta

El hidrógeno en estado gaseoso puede ser inyectado en el conducto de admisión usando inyectores, ya sean operados mecánica o electrónicamente (ver figura 32). 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 el hidrógeno 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 utilizan sistemas de inyección electrónica de combustible (EFI, *Electronic Fuel Injection*) ese tipo de inyector calcula la cantidad de hidrógeno que debe introducirse en cada cilindro.

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

La posición del inyector en el colector o conducto determinará 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 tratará 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 hidrógeno líquido 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.

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 en la cámara del cilindro.

Otra ventaja de la inyección frente a la carburación es que los tiempos de inyección son más adecuados, pudiéndose eliminar los problemas de preencendido y del retorno de llama. Esto es debido a que 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 preencendido del hidrógeno, ya que el aire que haya entrado en 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 quedar. Puesto que en el conducto de admisión habrá menos gas (aire o hidrógeno) en cualquier instante, cualquier preencendido que se produzca será mucho menos grave.

Figura 32. Inyección indirecta en *manifold* de admisión



Fuente: HHO System. *HHO Plus, Alternative energies, Ltd.* Consulta: 02 de diciembre de 2014.

5.5. Inyección directa

En los sistemas de inyección directa, el hidrógeno es inyectado directamente dentro de la cámara de combustión con la presión requerida al final del tiempo de compresión.

Como el hidrógeno tiene una difusión rápida la mezcla de hidrógeno se enciende instantáneamente. Mediante la inyección directa se obtienen rendimientos mayores que con los sistemas *Port Injection* y los sistemas *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 realizan esta inyección al final de la carrera de compresión.

La lubricación de este tipo de inyectores también hace más complicada la implementación del uso de estos con hidrógeno, ya que los combustibles, mayormente en el motor diésel, tienen la función de lubricar el inyector cuando este inyecta el combustible.

Figura 33. **Inyección directa**



Fuente: Motorpasión. *Inyección porche*. Consulta: 02 de diciembre de 2015.

6. EMISIONES EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN UTILIZANDO HIDRÓGENO

6.1. Emisión de humos e hidrocarburos

Ya se han visto algunas emisiones producidas por la quema de hidrocarburos, pero son cuatro emisiones de las más significantes de los motores de combustión interna ciclo Otto. Siendo estos los hidrocarburos (HC), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx) y el dióxido de carbono (CO₂).

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 combustibles fósiles que contienen 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.

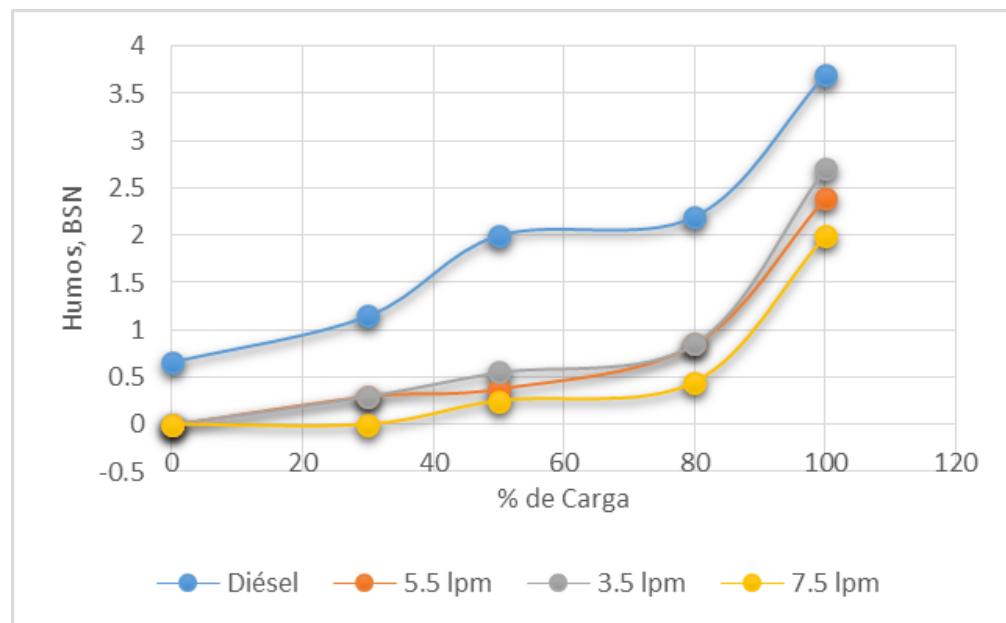
Los NOx, por su parte, son un problema para los motores diésel que usan hidrógeno como combustible dual. Aun así, se han registrado descensos en estas emisiones operando el motor con hidrógeno y diésel (siendo el hidrógeno el combustible principal), respecto al uso de diésel solamente.

Así, la composición de los humos depende del combustible que se usa y de las condiciones de combustión en que se quema. Las partículas del humo se componen generalmente de cenizas u hollín, generada por el carbono que se encuentra en el carburante.

En los sistemas de combustión dual de combustible diésel e hidrógeno se da un descenso de la liberación de partículas, siendo menores estos niveles de hollín cuanto mayor es la cantidad de hidrógeno que se inyecta, para cualquier caudal de hidrógeno, aunque siempre suele existir un caudal óptimo en que con menor cantidad de hidrógeno se consiguen las mismas concentraciones de humo. Esta disminución se da porque a mayor cantidad de hidrógeno se disminuye la fracción molar de carbono, limitando la generación de hollín.

En la siguiente figura se muestra la gráfica de humos vs carga del motor extraída de un experimento realizado por N. Saravanan y G. Nagarajan para Applied Energy en 2009. La unidad BSN corresponde a una unidad específica para los humos del instrumento utilizado para la medición.

Figura 34. Variaciones de humos con respecto a la carga del motor usando diferentes flujos de hidrógeno

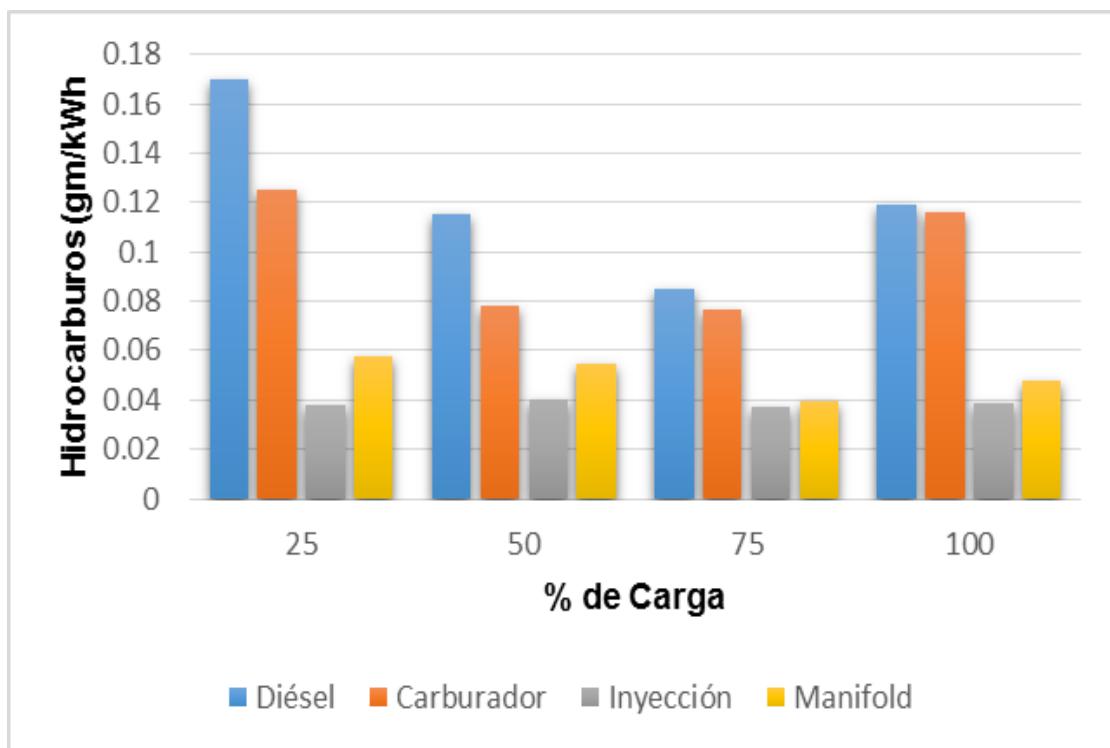


Fuente: XAUDARÓ, Crístian. *Inyección de hidrógeno como potencial mejora.* p. 58.

Por otro lado, para las emisiones de hidrocarburos, se produce unas mayores concentraciones de estos con la inyección de hidrógeno dependiendo del método de inyección en el motor. Si la inyección se introduce mediante el sistema PFI se producen mayores concentraciones de hidrocarburos respecto al diésel cuanto mayor es el caudal de este.

Asimismo, si se utiliza el método de inyección directa en el motor las concentraciones de hidrocarburos también son menores para el método de combustión dual hidrógeno–diésel.

Figura 35. **Variación de hidrocarburos con respecto a la carga del motor**



Fuente: Xaudaró, Crístian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora. p. 58.

6.2. Emisiones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂)

El monóxido de carbono es un gas cuya fórmula química es CO, es inodoro, incoloro, inflamable y altamente tóxico.

Este gas se produce por la combustión incompleta de los hidrocarburos. La formación de CO en la combustión de hidrocarburos, el radical que se obtiene sigue la siguiente reacción, convirtiéndose en CO.



Donde R es el radical del hidrocarburo. Se entiende como hidrocarburo radical a los compuestos en los que uno o más átomos de hidrógeno han sido extraídos. No puede existir en solitario, así que se recombina con elementos para formar nuevos compuestos.

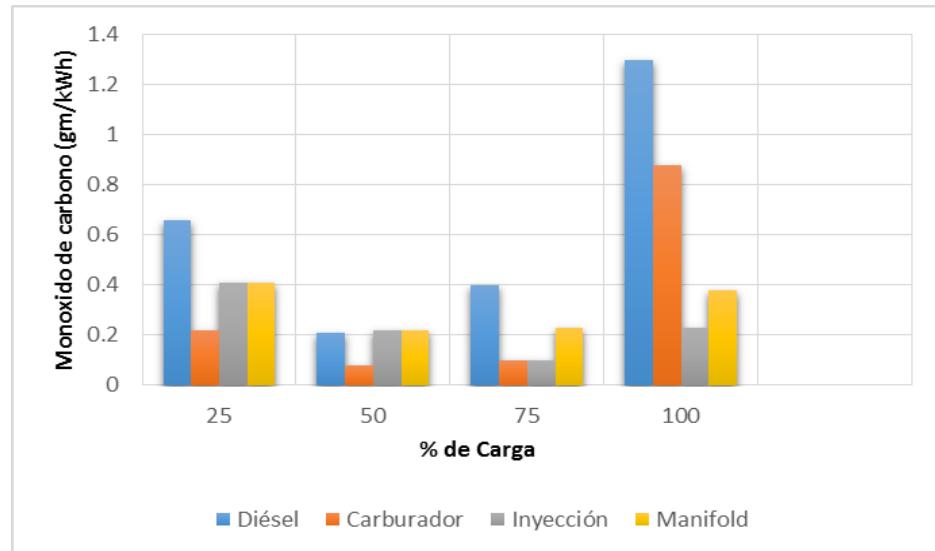
Cuando el CO se oxida da lugar a dióxido de carbono. El dióxido de carbono es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono.

Esta oxidación se produce en función de la cantidad de oxígeno disponible durante la combustión. En general cuando opera en modo dual hidrógeno-diésel e inyección en conducto la mezcla es ligeramente más rica que en la combustión con diésel solamente.

Aun así, los niveles de CO inferiores en los motores que trabajan con los dos combustibles simultáneamente, causan que el hidrógeno no disponga de carbono en su fórmula, evitando así su formación. Así pues, a mayor cantidad

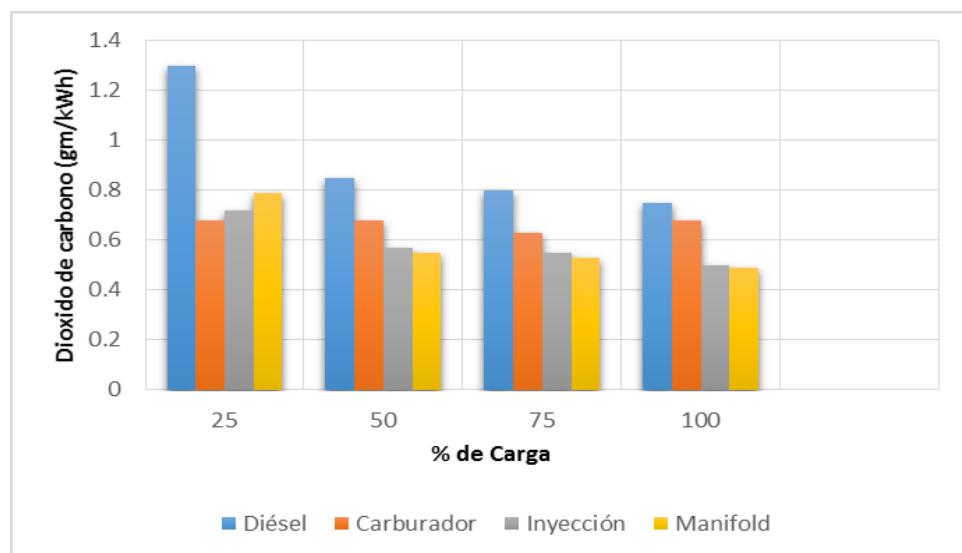
de hidrógeno, menores emisiones de monóxido de carbono (CO). De igual manera, se produce un descenso en los niveles de dióxido de carbono (CO₂).

Figura 36. Variación de monóxido de carbono respecto a la carga



Fuente: XAUDARÓ, Crístian. *Inyección de hidrógeno como potencial mejora*. p. 59.

Figura 37. Variación de dióxido de carbono respecto a la carga



Fuente: XAUDARÓ, Crístian. *Inyección de hidrógeno como potencial mejora*. p. 59.

Se toma en cuenta que las pruebas fueron realizadas con sistemas duales de combustibles diésel–hidrógeno y gasolina–hidrógeno. Esta es la razón de la disminución considerable de las emisiones de gases.

6.3. Emisiones de óxido nitroso (NOx)

Generalmente, el óxidos de nitrógeno (NOx) se clasifica en térmico, combustible y *prompt*. Los térmicos se forman a partir de la reacción del nitrógeno del aire y el oxígeno. Se producen en la combustión y tienen una dependencia exponencial en función de las temperaturas y del exceso de aire. Los óxidos de nitrógeno que se utilizan como combustibles se generan con la reacción del nitrógeno del combustible y del oxígeno, mientras que los *prompt* son una relativamente pequeña cantidad de óxidos de nitrógeno formados por unas reacciones no muy conocidas. Con ayuda de las altas temperaturas, el monóxido de nitrógeno (NO) se oxida generando el dióxido de nitrógeno (NO₂).

Sin duda alguna, los óxidos de nitrógeno son las emisiones que hacen cuestionarse más seriamente la inyección del hidrógeno en el motor, conjuntamente con diésel. Son el mayor problema a solucionar, al menos en lo que a pequeñas cantidades refiere.

Si bien con cantidades de hidrógeno mayores al 65 % se produce una disminución muy importante de estas emisiones, a cantidades que engloban entre el 0 y 10 %. Dependiendo del motor se produce un pequeño aumento en los óxidos de nitrógeno, mientras que este crecimiento es mucho mayor a partir de cantidades superiores entre el 15 y 20 %.

En todo caso se deben tomar medidas para evitar la formación de óxido de nitrógeno o, si ya se han formado, conseguir reducirlos en gran medida.

Las medidas más intuitivas para la reducción de óxido de nitrógeno son aquellas que intentan reducir la temperatura en la combustión, ya sea retrasando los inicios de la inyección de combustible (mediante unidades de control electrónico, ECU) o introduciendo agua en el motor, para que absorba calor.

Otros sistemas más sofisticados son la recirculación de gases de escape (*EGR Exhaust Gas Recirculation*) y la reducción catalítica selectiva (*SCR, Selective Catalytic Reduction*), que reducen las emisiones de estos gases mediante distintos mecanismos.

6.4. Reducción de las emisiones de óxido nitroso (NOx)

Existen muchos métodos para reducir los gases de óxidos de nitrógeno. Una solución inmediata podría ser la mezcla de gasolina con hidrógeno en un sistema dual de combustible. Una mezcla de gas comercialmente disponible conocida como *Hythane* contiene 20 % de hidrógeno y 80 % de gas natural. Con esta relación, no se requieren modificaciones en el motor de gas natural. Estudios han demostrado que la emisión de gases contaminantes se ha reducido en más del 20 %. Mezclas con más del 20 % de hidrógeno con gas natural pueden reducir aún más las emisiones de gases contaminantes, pero se requieren de algunas modificaciones en el motor.

Trabajar un motor de combustión interna con una mezcla pobre de combustible es ventajoso en términos de emisiones de óxido de nitrógeno y de economía del combustible.

Para motores que trabajan con hidrocarburos, cuando operan con mezclas pobres de combustible producen una menor emisión de monóxido de carbono y de hidrocarburos no quemados.

6.4.1. Mediante ajustes a la *engine control unit* (ECU)

Una central electrónica, también conocida como unidad de control electrónico o ECU (*Engine Control Unit*), es un dispositivo normalmente conectado a una serie de sensores que le proporcionan información y dispositivos que controlan sus comandos.

Este dispositivo, también conocido como PCM (*Power-train Control Module*) es un tipo de control electrónico que determina la cantidad de combustible, los tiempos de encendido y otros parámetros que un motor de combustión interna necesita para mantenerse en funcionamiento. El aparato lee los valores dispuestos por los sensores y calcula cuáles han de ser las acciones a realizar.

Antes de la existencia de las ECU la mezcla de aire-combustible, los tiempos de inyección o de encendido eran controlados mediante sistemas mecánicos y neumáticos.

En lo referente a la disminución de óxidos de nitrógeno se ha determinado que se obtienen mejores resultados inyectando el combustible diésel a los 23º de cigüeñal antes del punto muerto superior; mientras que la inyección óptima del hidrógeno se da a 5º del cigüeñal antes del fin de la carrera de inyección en los sistemas duales. La duración de esta inyección óptima para ambos combustibles es de 30º de cigüeñal.

6.4.2. Mediante enriquecimiento del hidrógeno con éter etílico

Además de hidrógeno se pueden introducir otras substancias al motor, estas sustancias, en función de las proporciones o de sus fórmulas químicas reaccionarán dando lugar a efectos diversos. Una de las sustancias que se pueden introducir en el motor es el éter etílico.

El éter etílico es un éter líquido, incoloro, muy inflamable, con un bajo punto de ebullición, de sabor acre y ardiente. Es más ligero que el agua (su densidad es de 736 kg/m³). Sin embargo su vapor es más denso que el aire (2,56 kg/m³). El éter etílico hierve con el calor de la mano (34,5 °C), y se solidifica a -116 °C.

Es un buen disolvente de las grasas, azufre, fósforo y otros. Tiene aplicaciones industriales como disolvente y en las fábricas de explosivos.

Tabla XIX. Propiedades del hidrógeno en comparación con el diésel y el éter etílico

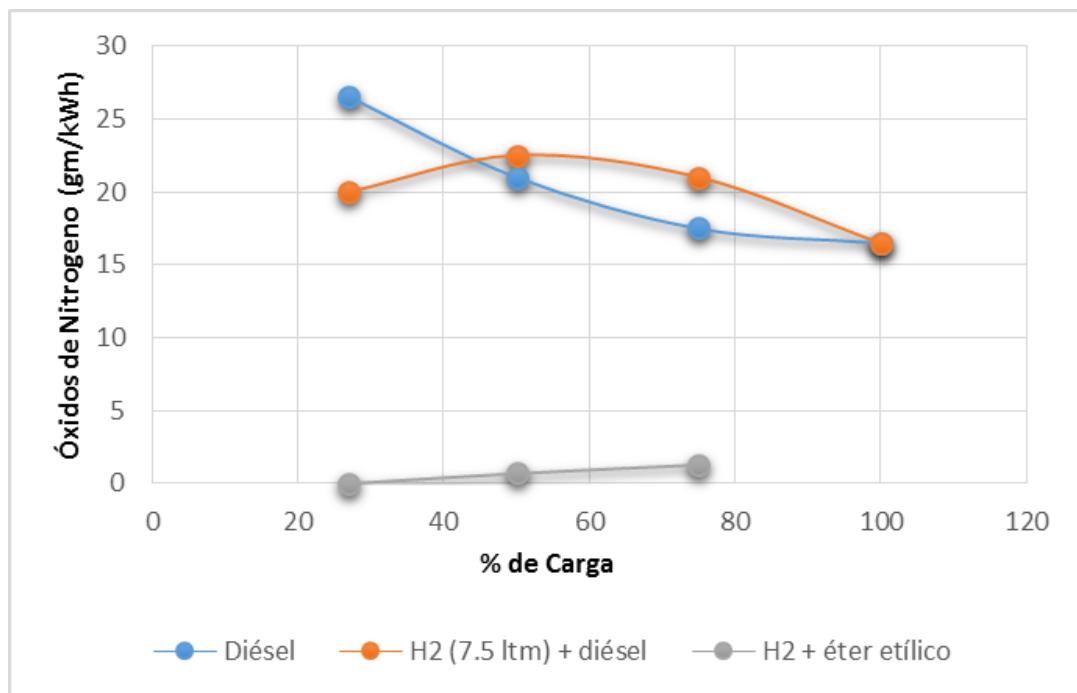
Propiedades	Diésel	Hidrógeno	Éter etílico
Formula	C _n H _{1.8n} C ₈ -C ₂₀	H ₂	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅
Temperatura de auto ignición (K)	530	858	433
Energía mínima de ignición (mJ)	-----	0.02	-----
Límites de inflamabilidad %vol.	0,7 – 5	4 – 75	1,9 – 36
Relación estequiométrica aire – combustible	14,5:1	34,3:1	11,1:1
Peso molecular (g mol)	170	2,02	74
Densidad a 160 °C y 1 bar	833 - 881	0,0838	713
Numero de Cetano	40 – 55	-----	>125

Fuente: FRANCO, Daniel. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas*. p. 121.

En experimentos realizados en la Universidad Anna de Chennai se realizaron diversas pruebas en las que se inyectaba conjuntamente en un motor diésel y éter etílico.

Los resultados de las investigaciones fueron muy superiores a lo esperado. En dicho estudio se determinó que la eficiencia en el freno con hidrógeno y diésel aumentaba un 20 % respecto al valor base (el del diésel solamente), pero que en contraposición los óxidos de nitrógeno sufrían un aumento del 13 % comparado con el diésel.

Figura 38. **Variación de óxidos de nitrógeno con la carga**



Fuente: Xaudaró, Crístian. Inyección de hidrógeno como potencial mejora. p. 63.

Se determinó que el momento para inyectar el éter etílico en el colector de admisión es 40° de cigüeñal después del inicio de la carrera de aspiración.

Estos resultados se deben en gran parte a la baja temperatura de evaporación e ignición del éter, mucho inferior a la del hidrógeno y en menor medida para el diésel.

Al evaporarse antes, absorbe parte del calor del motor disminuyendo la temperatura al inicio del ciclo, además, con pronta combustión se limita el oxígeno de la mezcla. Para la combustión del diésel y del hidrógeno, empobreciendo la mezcla, pero dificultando las posibles reacciones causantes de los óxidos de nitrógeno.

6.4.3. Mediante la recirculación de los gases de escape

El sistema de recirculación de gases de escape controla las emisiones de óxidos de nitrógeno manteniendo la temperatura de la cámara de combustión a una temperatura inferior a la temperatura a la cual se forman los óxidos de nitrógeno, mediante la recirculación de una cantidad pequeña de gases de escape (20–30 % máximo). Entonces, la combinación del nitrógeno con el oxígeno no puede hacerse por falta de temperatura en los gases.

El principio de funcionamiento es la reintroducción de los gases de escape otra vez en el interior del colector de admisión. Este se mezcla con el aire fresco y se diluye reduciendo el contenido de oxígeno que puede reaccionar con el combustible, reduciendo la temperatura pico.

Los gases de combustión recirculados deben ser enfriados antes de ser reintroducidos con tal de mejorar la eficiencia volumétrica del motor, a su vez mejorando la potencia obtenida respecto a una recirculación sin enfriamiento.

Actualmente existen válvulas EGR digitales, las cuales funcionan independientemente del vacío del múltiple de admisión. Estas válvulas poseen tres orificios, que son abiertos y cerrados eléctricamente por medio de solenoide, los cuales son controlados por la ECU.

Los estudios realizados en la Universidad Anna de Chennai en 2007 sobre el uso de esta tecnología para motores *bifuel* de hidrógeno y diésel (*An experimental investigation on hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation technique*), mediante el uso de la EGR se consigue una mejor economía de combustible y reducciones de hasta el 25 % de los óxidos de nitrógeno. Sin embargo, se producen aumentos en las emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarburos.

Aun y las desventajas del sistema frente a un sistema dual en lo referente a óxidos de carbono, las emisiones son inferiores a las generadas por un motor únicamente diésel, convirtiendo la implementación de este sistema en una buena opción para mejorar medioambientalmente los motores diésel existentes.

6.4.4. Mediante reducción catalítica

El SCR (*Selective Catalytic Reduction*) es una de las tecnologías más eficientes para reducir los óxidos de nitrógeno. Esta tecnología está siendo usada ampliamente hoy en día.

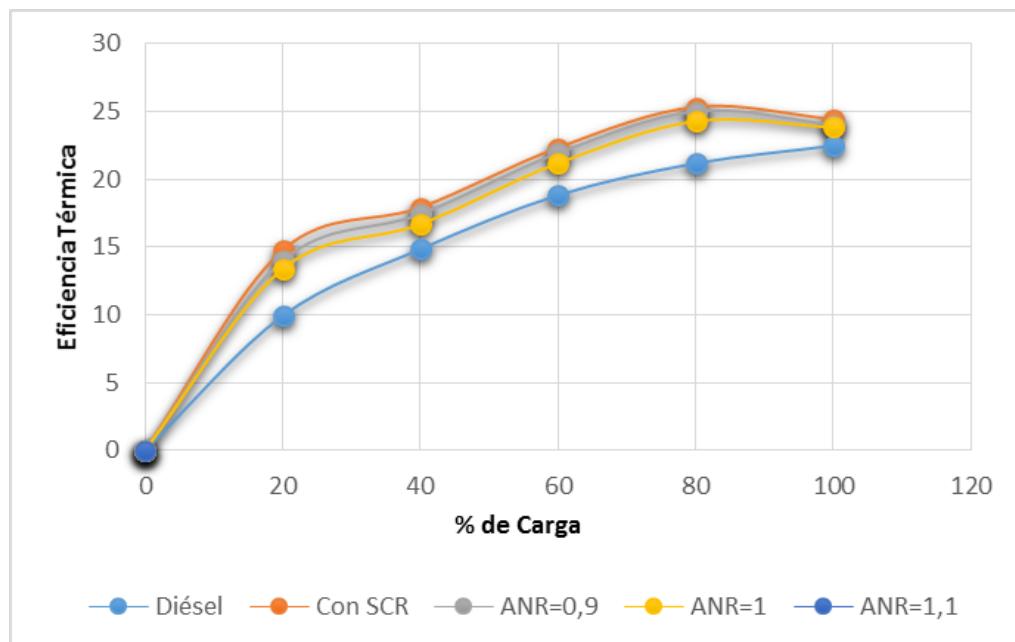
En este sistema, el agente de reducción es inyectado dentro del sistema SCR. La distancia entre el inyector y el sistema SCR debe ser tal que permita la vaporización del agente reductor para crear una mezcla homogénea con los gases de escape y se forme la reacción. Existen varios catalizadores para que

se produzca la reacción de reducción de óxidos de nitrógeno. Tales como etileno, queroseno, N-hexano, amoniaco y otros derivados de hidrocarburos.

A parte de las reacciones principales del SCR existen algunas reacciones no deseadas que pueden producirse como reacciones con el oxígeno. Estas reacciones provocarán emisiones secundarias o un consumo improductivo de amoniaco. Entre las emisiones secundarias estarían los mismos óxidos de nitrógeno haciendo, en cierta medida, que el sistema SCR no fuera necesario.

No obstante, en general se puede concluir que los motores operados con sistema dual *fuel* hidrógeno–diésel tienen una notable mejora en el rendimiento y en emisiones, siendo la técnica SCR adecuada para ser instalada en este tipo de motores y controlar efectivamente las reacciones de los óxidos de nitrógeno.

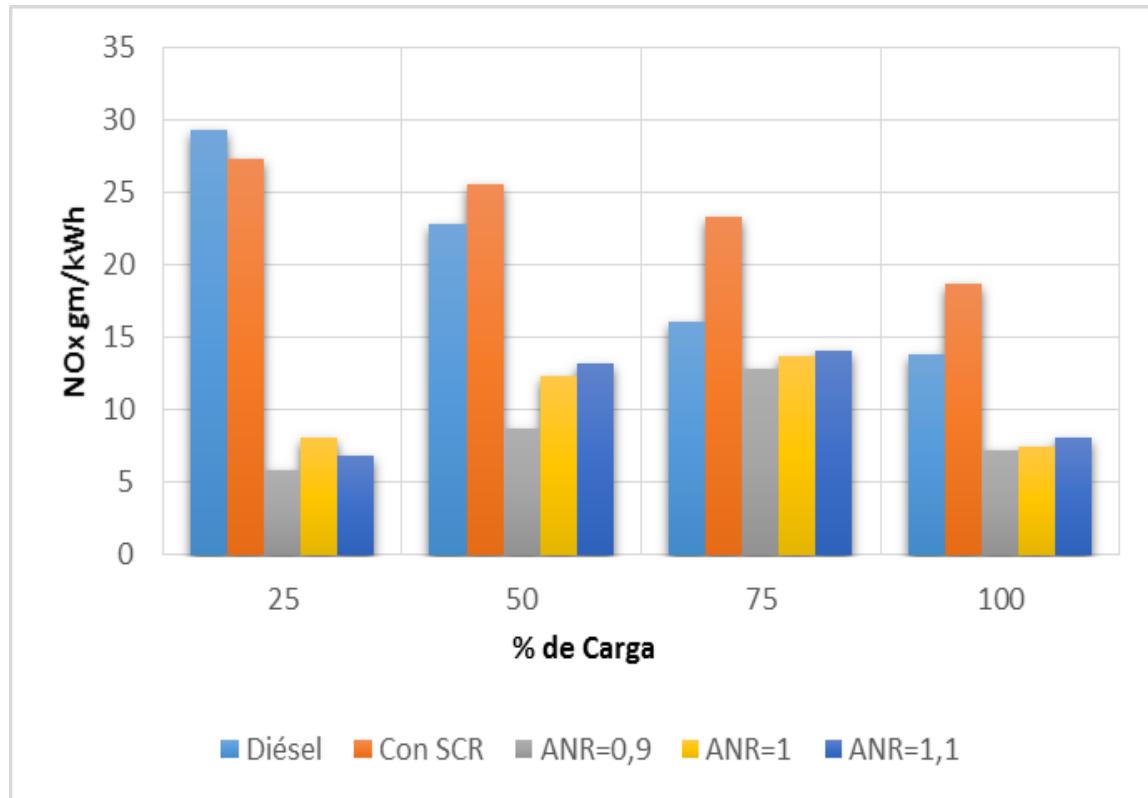
Figura 39. Variación de la eficiencia térmica con la carga



Fuente: XAUDARÓ, Crístian. *Inyección de hidrógeno como potencial mejora*. p. 6.

Comparado con los motores diésel convencionales, el uso de hidrógeno y diésel como combustible genera vapor de agua a altas cantidades. Así pues, cierta cantidad de amoniaco (NH_3) reaccionará directamente con el oxígeno en los gases, se convertirá en dióxido de nitrógeno (N_2) y dejará el sistema.

Figura 40. Variación de óxidos de nitrógeno respecto a la carga del motor



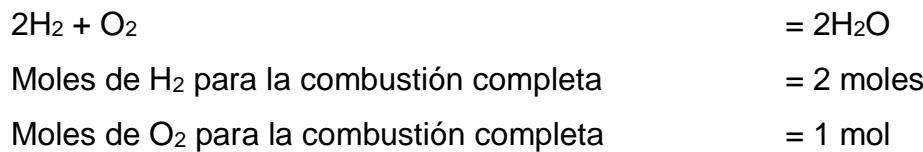
Fuente: XAUDARÓ, Crístian. *Inyección de hidrógeno como potencial mejora*. p. 69.

ANR es el rango entre el flujo de amoniaco y el flujo de óxidos de nitrógeno. La mejor opción sería el rango de $\text{ANR} = 1$. Mezcla dual de diésel e hidrógeno seria la ideal para reducir los gases de óxidos de nitrógeno.

7. HIDRÓGENO UTILIZADO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

7.1. Relación de aire-combustible

La combustión teórica o estequiométrica del hidrógeno y el oxígeno está dada por:



Debido a que el aire es usado como oxidante en lugar del oxígeno, el nitrógeno en el aire necesita ser incluido en los cálculos:

$$\begin{aligned} \text{Moles de N}_2 \text{ en el aire} &= \text{moles de O}_2 * (79\% \text{ N}_2 \text{ en el aire} / 21 \% \text{ O}_2 \text{ en el aire}) \\ &= 1 \text{ mol de O}_2 * (79\% \text{ N}_2 \text{ en el aire} / 21 \% \text{ O}_2 \text{ en el aire}) \\ &= 3,762 \text{ moles de N}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Número de moles en el aire} &= \text{moles de O}_2 + \text{moles de N}_2 \\ &= 1 + 3,762 \\ &= 4,762 \text{ moles de aire} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso de O}_2 &= 1 \text{ mol de O}_2 * 32 \text{ g/mol} \\ &= 32 \text{ g} \\ \text{Peso de N}_2 &= 3,762 \text{ moles de N}_2 * 28 \text{ g/mol} = 105,33 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Peso de aire} &= \text{peso de O}_2 + \text{peso de N}_2 \\
 &= 32 \text{ g} + 105,33 \text{ g} \\
 &= 137,33 \text{ g}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Peso de H}_2 &= 2 \text{ moles de H}_2 * 2 \text{ g/mol} \\
 &= 4 \text{ g}
 \end{aligned}$$

La relación estequiométrica aire–combustible para el hidrógeno y el aire es:

$$\begin{aligned}
 \text{Aire–combustible basado en la masa} &= \text{masa de aire–combustible} \\
 &= \frac{137,33 \text{ g}}{4 \text{ g}} \\
 &= 34,33:1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Aire–combustible en el volumen} &= \text{vol(moles) de aire–combustible} \\
 &= \frac{4,762}{2} \\
 &= 2,4:1
 \end{aligned}$$

El porcentaje de la cámara de combustión ocupado por hidrógeno para una mezcla estequiométrica:

$$\begin{aligned}
 \% \text{H}_2 &= \text{volumen (moles) H}_2 / \text{volumen total} \\
 &= \text{volumen H}_2 / (\text{vol. de aire} + \text{vol. de H}_2) \\
 &= \frac{2}{(4,762+2)} \\
 &= 29,6\%
 \end{aligned}$$

De acuerdo a los cálculos anteriores, la relación estequiométrica o química correcta de aire-combustible para la combustión completa del hidrógeno en el aire es de 34:1 por masa. Esto significa que para una combustión completa, se necesitan 34 kg de aire por cada 1 kg de hidrógeno. Esto es mucho más alto que la relación aire-combustible de 14,7:1 requerida para la gasolina.

7.2. Problemas de preencendido

El primer problema que se encuentra en el desarrollo de los motores de hidrógeno es el encendido prematuro. El problema del encendido prematuro es mucho mayor en los motores de hidrógeno que en otros motores de combustión interna, debido a la baja energía de encendido del hidrógeno, el ancho rango de inflamabilidad y la pequeña distancia de extinción.

El encendido prematuro ocurre cuando la mezcla de combustible en la cámara de combustión se enciende antes del encendido por medio de la bujía, y da como resultado un motor ineficiente.

Diversos estudios se han hecho para determinar la causa del preencendido en los motores de hidrógeno. Algunos de los resultados sugieren que el preencendido es causado por los puntos calientes en la cámara de combustión, tales como, los puntos calientes en la bujía de encendido o en la válvula de escape. Otras investigaciones han demostrado que el encendido anterior puede darse cuando hay traslape entre la apertura de la válvula de admisión y el cierre de la válvula de escape.

Se piensa también que la descomposición química, producida por el calor, del aceite suspendido en la cámara de combustión o en las rendijas justo arriba del anillo superior del pistón pueden contribuir al preencendido.

7.3. Sensores de fugas

Este debe ser capaz de percibir la presencia de hidrógeno y pasa una serie de señales de alarma al sistema de control. Los sensores de fugas de gas están calibrados para medir concentraciones de gas de hidrógeno. Los sensores están generalmente instalados en los compartimentos de los cilindros de combustible, dentro de la caja de llenado, radiadores, baterías, mangueras y otros. Los sensores están casi siempre cubiertos para prevenir que les entre agua y suciedad, y se montan en gomas especiales para protegerlos de las vibraciones.

Se hace esto con el fin de prevenir que ocurra un encendido o explosión por una atmósfera cargada de hidrógeno, dependerá de cada fabricante implementar este tipo de dispositivos, o tomar las medidas necesarias para garantizar la seguridad.

7.4. Inyección central

El hidrógeno no puede ser directamente inyectado en un motor diésel debido a que la temperatura de autoignición del hidrógeno es muy alta. Así los motores diésel deben ser equipados con bujías o utilizar una pequeña cantidad del combustible diésel para la ignición del gas (conocido como encendido piloto). Aunque la técnica del encendido piloto ha sido desarrollada para usos con gas natural, no se está haciendo actualmente con el hidrógeno.

Los motores de hidrógeno más sofisticados utilizan inyección directa en la cámara de combustión durante el ciclo de compresión. En la inyección directa, la válvula de admisión está cerrada cuando se inyecta el combustible, evitando

completamente el encendido prematuro durante el ciclo de admisión. En consecuencia, en el motor no hay encendido en el colector de admisión.

La potencia de salida de un motor de hidrógeno de inyección directa es 20 % mayor que en un motor de gasolina y 42 % mayor que el motor de hidrógeno con carburador.

7.5. Sistema de encendido

Debido al bajo límite de energía de encendido del hidrógeno, encender el hidrógeno es muy fácil y se puede utilizar sistemas de encendido de gasolina. Con una relación de aire-combustible muy pobre (130:1 a 180:1) la velocidad de la llama es considerablemente reducida y se prefiere el uso de sistemas de encendido con doble bujía.

Las bujías para el motor de hidrógeno deben ser del tipo frío y no tener punta de platino. Una bujía de tipo frío es aquella que transfiere calor desde la punta de la bujía hacia la culata más rápidamente que una bujía de tipo caliente. Esto significa que se reducen las posibilidades de que la punta de la bujía encienda la mezcla aire-combustible, y provoque el preencendido. Las bujías tipo caliente son diseñadas para mantener una cierta cantidad de calor que hace que los sedimentos de carbono no se acumulen. Debido a que el hidrógeno no contiene carbono, una bujía tipo caliente no cumple esa función útil.

Las bujías no deben tener punta de platino ya que el platino es un catalizador, y provoca que el hidrógeno se oxide con el aire.

7.6. Ventilación del cárter del cigüeñal

Esto es aún más importante para los motores de hidrógeno que para los motores de gasolina. Como en los motores de gasolina, el combustible que no se quema se puede filtrar por los anillos del pistón y entrar al cárter del cigüeñal.

Debido a que el hidrógeno tiene una energía de ignición baja, cualquier combustible que no se queme y entre al cárter del cigüeñal tiene una gran posibilidad de encenderse. Debe evitarse la acumulación de hidrógeno en el cárter del cigüeñal por medio de la ventilación.

Un encendido dentro del cárter del cigüeñal puede hacer un ruido notable o dar como resultado que se produzca fuego en el motor. Cuando el hidrógeno se enciende dentro del cárter del cigüeñal, ocurre un aumento de presión repentino. Para aliviar esta presión, una válvula de alivio de presión debe de ser instalada en el cárter del cigüeñal.

Los gases de escape se pueden filtrar por los anillos de los pistones dentro del cárter del cigüeñal. Debido a que el gas de escape del hidrógeno es vapor de agua, el agua se acumula condensándose en el cárter del cigüeñal cuando se tiene la ventilación inapropiada. La mezcla de agua y aceite en el cárter del cigüeñal reduce la capacidad de lubricación del aceite, dando lugar a un mayor desgaste del motor.

7.7. Eficiencia térmica

La eficiencia termodinámica teórica de un motor de ciclo Otto está basada en la relación de compresión del motor y la relación de calores específicos del combustible como se muestra en la figura siguiente:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}}$$

Donde:

V_1/V_2 = relación de compresión

γ = relación de calores específicos

η_{th} = eficiencia termodinámica teórica

Cuanto mayor sea la relación de compresión o la relación de calores específicos, mayor será la eficiencia termodinámica del motor. La relación de compresión límite de un motor está basada en la resistencia del combustible al golpe. Una mezcla pobre de hidrógeno es menos susceptible al golpe que la gasolina convencional y por ello puede tolerar mayores relaciones de compresión.

La relación de calores específicos está relacionada con la estructura molecular del combustible. Cuanto menos compleja sea la estructura molecular, mayor será la relación de calores específicos. El hidrógeno tiene una estructura molecular más simple que la gasolina ($\gamma = 1,4$) y por ello su relación de calores específicos es mayor que la gasolina convencional ($\gamma = 1,1$).

7.8. Potencia de salida

La potencia máxima teórica de salida del motor de hidrógeno depende de la relación aire–combustible y del método utilizado para la inyección de combustible.

Como se demostró, la relación estequiométrica de aire–combustible para el hidrógeno es 34:1. Con esta relación de aire–combustible, el hidrógeno se desplazará el 29 % del volumen de la cámara de combustible dejando solo un 71 % para el aire. Como resultado, el contenido energético de la mezcla será menor que el que tuviera si la mezcla fuera solamente gasolina (debido a que la gasolina es líquida, esta solo ocupa un volumen pequeño de la cámara de combustible, y así permite que entre más aire).

Debido a que tanto el método carburado, como el de puerto de inyección mezclan el combustible y el aire antes de entrar a la cámara de combustión, este sistema limita la potencia máxima teórica obtenible a aproximadamente 85 % de aquella de los motores de gasolina. Para sistemas de inyección directa, los cuales mezclan el combustible con el aire después de que la válvula de entrada se cierra (y así la cámara de combustión tiene un 100 % de aire), la salida máxima del motor puede ser aproximadamente 15 % mayor que aquella para los motores de gasolina.

Así, dependiendo de cómo se ingresa el combustible a la cámara de combustión, la máxima potencia de salida para el motor de hidrógeno puede ser entre 15 % mayor o 15 % menor que el de gasolina si se utiliza la relación estequiométrica aire–combustible. Sin embargo, a la relación de aire–combustible estequiométrica, la temperatura de combustión es muy alta y como resultado se forma una gran cantidad de óxido nitroso, el cual es un

contaminante crítico. Debido a que una de las razones de utilizar hidrógeno es su baja emisión de gases de escape, los motores de hidrógeno no están normalmente diseñados para trabajar con relación de aire-combustible estequiométrica.

Generalmente, los motores de hidrógeno están diseñados para usar cerca de dos veces más aire que el requerido teóricamente para una combustión completa. Con esta relación de aire-combustible, la formación de óxido nitroso es disminuida a casi cero. Desafortunadamente, esto también reduce la potencia de salida cerca de la mitad de un motor de gasolina de tamaño similar.

Para compensar las pérdidas de potencia, los motores de hidrógeno son generalmente más grandes que los motores de gasolina y están equipados con turbo cargadores.

El motor rotativo o Wankel parece estar dando buenos resultados al emplear hidrógeno como combustible, según ensayos realizados con dinamómetro una vez resueltos los problemas que presentaba en lo que a estanqueidad se refiere. Estos buenos resultados se deben a la configuración de este motor, el cual minimiza las dificultades de combustión que se dan en otros tipos de motores.

El motor rotativo no suele dar problemas de autoencendido pues, la cámara de combustión presenta una geometría adecuada para la combustión del hidrógeno, con una relación volumen-superficie muy elevada. De todos modos, suponiendo que los gases de escape fueran responsables del autoencendido, tampoco plantearían problemas en el motor Wankel, ya que cuando los gases frescos entran, la cámara ya se encuentra vacía y los gases de escape, lejos.

En este tipo de motor es posible el aprovechamiento de la alta temperatura de ignición del hidrógeno. Se está investigando la posibilidad de incluir agua pulverizada en la mezcla de entrada, la cual se evapora al quemarse el hidrógeno llegando a ejercer presiones muy altas de forma elástica, a diferencia de lo que ocurre en el pistón, en el cual se da una detonación. Actualmente se está tratando de conseguir que la mayor parte de la potencia se deba a la acción del vapor de agua y no al hidrógeno.

Otra ventaja más de este motor radica en su relación potencia-peso, ya que este tipo de motor desarrolla una alta potencia en comparación con su tamaño. La compañía Reg Technologies ha conseguido una relación potencia-peso cerca de los 0,34 kg/CV, una cantidad ínfima comparada con los 2,72 kg/CV que presenta el motor de combustión interna alternativo.

No obstante, el motor Wankel no está libre de defectos pues presenta un problema en lo que a lubricación se refiere. El aceite empleado en la lubricación de los sellos se encuentra en contacto con la mezcla de combustible y aire, con lo que al producirse la combustión, no solo se quemará el hidrógeno, sino que también lo hará el aceite.

Otro problema que aún hoy no ha sido resuelto del todo es el denominado *dieseling*, que se produce a causa de la precisión del punto de combustión, ya que en caso de retrasarse un poco puede ocurrir que la combustión comience antes de que el rotor alcance su posición adecuada. En estos casos, que se suelen dar cuando la velocidad es baja, la explosión empuja al rotor en sentido contrario al ciclo de rotación, provocando daños importantes en el motor.

A pesar de todo, la compañía Mazda ha desarrollado varios automóviles que cuentan con este tipo de motor desde 1970. Según la propia compañía, ofrecen unas prestaciones casi iguales que la de los motores de cuatro tiempos convencionales e incluso superiores en algunos aspectos. Recientemente, la compañía japonesa ha adaptado algunos modelos de forma que empleen hidrógeno como combustibles. Dichos modelos son el HR-X1, HR-X2 y el MX-5.

Tabla XX. Comparativo del motor Mazda MX-5

Tipo de motor	Gasolina	Hidrógeno	Eléctrico
Potencia CV	120	110	-----
Velocidad máxima km/h	183	150	130
0-100 km/h (seg.)	9,4	13	21,5
Tiempo de recarga	3 minutos	15 minutos	Horas

Fuente: FRANCO, Daniel. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas*. p. 94.

Se observa que las diferencias entre el modelo de gasolina y de hidrógeno no son muy grandes, al menos en comparación con el modelo eléctrico, por lo que el uso del hidrógeno constituye una solución real.

Los motores de ciclo Otto permiten aprovechar las especiales características que presenta el hidrógeno como combustible. Con un adecuado diseño se consigue un motor con un rendimiento energético mayor que el equivalente en gasolina y totalmente ecológico. El alto número de octanos permite elevar la relación de compresión que se traducirá en un aumento del rendimiento energético, mientras que la alta velocidad de llama contribuye a la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Gracias a estas y otras posibilidades se puede aumentar el rendimiento total del sistema hasta un 25 y 30 % con respecto a los motores equivalentes en gasolina.

Las prestaciones de este nuevo motor son muy similares a las que vienen ofreciendo los motores que emplean hidrocarburos como combustible, tal como se ve en la tabla XXI, donde se comparan dos modelos de BMW prácticamente idénticos, pero con motor de gasolina (750 IL) e hidrógeno (750 HL).

Tabla XXI. Tabla comparativa del motor de hidrógeno vs gasolina en modelos BMW idénticos

Motor	750 IL	750 HL
Combustible	Gasolina súper	H ₂
# de Cilindros	12	12
Válvulas por cilindro	2	2
Desplazamiento (cm ³)	5379	5376
Potencia máxima (CV)	243	204
Velocidad máxima (km/h)	250	226
Aceleración 0 -100 km/h (s)	6,8	9,6
Tiempo recorrido 1 km (s)	26,7	26,1

Fuente: FRANCO, Daniel. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas*. p. 95.

Se puede apreciar que las prestaciones empeoran un poco con respecto al modelo de gasolina. La disminución de potencia se puede explicar gracias al poder calorífico (Qc) de la mezcla que entra en el pistón.

$$Qc = li * \frac{PM_{combustible}}{22,4} * \frac{F}{F + \frac{PM_{combustible}}{PM_{aire}}} \left[\frac{kJ}{lt} \right]$$

Para la gasolina

$$L_i = 40 \text{ MJ/kg}$$

$$PM_{\text{gasolina}} = 168 \text{ g/mol}$$

$$F = 1 \text{ N}$$

$$PM_{\text{aire}} = 28,9 \text{ g/mol}$$

$$Q_c = 44 \text{ kJ/kg}$$

Para el hidrógeno

$$L_i = 100 \text{ MJ/kg}$$

$$PM_{\text{hidrogeno}} = 1 \text{ g/mol}$$

$$F = 1 \text{ N}$$

$$PM_{\text{aire}} = 28,9 \text{ g/mol}$$

$$Q_c = 7,6 \text{ kJ/kg}$$

Por medio de estos cálculos se demuestra que la potencia ofrecida por un motor de gasolina será mayor que la del mismo motor en el caso de quemar hidrógeno, siempre y cuando la relación en peso entre combustible y aire sea la misma para los dos casos.

Ahora bien, la posibilidad de usar hidrógeno como combustible se va volviendo factible en acuerdo a los avances tecnológicos que se pudieron presentar en este trabajo.

CONCLUSIONES

1. La producción de hidrógeno por medio de electrólisis, utilizando energía eléctrica, es la manera más limpia y barata de obtener dicho combustible. Una de las principales características de la electrólisis es que puede ser totalmente no contaminante y utiliza recursos renovables como la luz solar; aun cuando se requieran grandes cantidades de energía. También el producto tiene alta pureza y es factible para la producción de hidrógeno en pequeña y gran escala.
2. Para combustionar hidrógeno en un motor de combustión interna es necesario hacer modificaciones en la cámara de combustión para lograr la relación de compresión de la mezcla aire–hidrógeno. Si se utiliza un sistema *bifuel* no es necesario realizar ningún cambio en la cámara de combustión, ya que el combustible principal sería el destilado de petróleo.
3. Debido a que el hidrógeno tiene una energía de ignición baja, cualquier residuo del combustible que no se combusione puede filtrarse al cárter del cigüeñal por medio de los anillos; esto podría ocasionar una explosión en el motor por la acumulación del gas. Los gases de escape se pueden filtrar por los anillos de los pistones dentro del cárter del cigüeñal. Debido a que el gas de escape del hidrógeno es vapor de agua, esta se podría acumular en el cárter del cigüeñal por medio de la condensación. La mezcla de agua y aceite reduce la capacidad de lubricación del aceite, dando lugar a un mayor desgaste en el motor.

4. La seguridad de hidrógeno cubre la producción, el manejo y uso seguro del hidrógeno. El hidrógeno presenta desafíos únicos debido a la facilidad con que se producen fugas, ignición a baja energía, una amplia variedad de mezclas aire-combustible, la flotabilidad y su habilidad para debilitar metales es lo que se debe de considerar para asegurar operaciones seguras. Estos y muchos más retos deben de ser superados para que operen los vehículos con un combustible como el hidrógeno.
5. Como se pudo comprobar la potencia entregada por un motor de ciclo Otto que combustioná gasolina es ligeramente superior a un motor de ciclo Otto que combustioná hidrógeno a través de una celda de carga. Si de tema de contaminación se trata el motor de ciclo Otto que combustioná hidrógeno supera por mucho al motor que combustioná gasolina. Por aparte el motor Wankel promete mejores prestaciones y la reducción de problemas en cuanto al autoencendido, el mejoramiento de la relación peso-potencia, la lubricación, el enfriamiento, entre otros.

RECOMENDACIONES

1. Fomentar la investigación, tecnificación y desarrollo de tecnología para la utilización de hidrógeno en los motores de combustión interna. Se puede asegurar que los productos derivados del petróleo se acabarán, por eso es necesario la temprana implementación de un combustible alternativo que sea económico, renovable y con bajas emisiones que contaminen el medio ambiente.
2. Es necesario un rediseño completo de todos los elementos mecánicos que intervienen en la combustión del hidrógeno, dentro del motor como ejemplo pistones, anillo de compresión, anillos aceiteros, válvulas, sellos de válvulas y otros. Esto con el fin de evitar que el hidrógeno se escape y se acumule en otras áreas del motor que no sea la cámara de combustión. Esta característica de los motores actuales podría causar daños severos al motor si este se llegara a combustionar fuera de la cámara de combustión.
3. Para usar hidrógeno se necesita un constante mantenimiento a los motores de combustión interna, esto porque los actuales motores no están diseñados para combustionar este gas y los vapores que resultan de su combustión. El chequeo constante del aceite y la revisión constante de las piezas del motor en búsqueda de óxido y corrosión; esto debido a la presencia de vapor de agua en la combustión. Se recomienda un programa de mantenimiento más constante para los motores.

4. Es de suma importancia, no aplicar el hidrógeno como combustible en los motores de combustión sin conocer a fondo todas las medidas de seguridad necesarias para realizar esta actividad. La negligencia en la mala manipulación de este gas podría resultar en accidentes fatales. El hidrógeno es extremadamente explosivo debido a la velocidad con que este se quema. Un incendio con hidrógeno es menos perjudicial que uno de gasolina, pero si se cuenta con todos los accesorios y elementos de seguridad para manipularlo e implementarlo. Se recomienda no manipular hidrógeno sin la plena experiencia.
5. El motor Wankel es un motor que promete mucho para la utilización del hidrógeno como combustible alternativo. Las fallas que se presentan en los motores actuales lo hacen ver como una alternativa a usar en un futuro no muy lejano. Será necesario un estudio profundo de las características de este motor

BIBLIOGRAFÍA

1. ACEVEDO BENITEZ, J. Idania. *Generación de hidrógeno por microorganismos.* México: CINVESTAV, 2004. 265 p.
2. GÁMEZ FRANCO, D. *El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas.* (Tesis Lic. Tecnología, Física y Química). INS La Ferrería, 2010. 136 p.
3. GUTIERREZ JODRA, L. (2005). *El hidrógeno, combustible del futuro.* España: Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2005. 19 p.
4. MOLINA MOJICA, J. *Determinación de las propiedades termodinámicas de la mezcla de gases de combustión considerando doce especies.* Universidad de Pamplona, Colombia: Facultad de Ingenierías y Arquitectura, 2007. 131 p.
5. RIFKIN, J. *La economía del hidrógeno: La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la Tierra.* Barcelona: Paidós, 2002. 196 p.
6. ROBLES SICAI, F. *Fundamentos de la generación de energía eléctrica por medio de celdas de combustible utilizando hidrogeno.* Trabajo de graduación de Ing. Eléctrico. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2005. 258 p.

7. SARAVANAN, N. *An experimental investigation on Hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation technique*. Estados Unidos: Applied energy. 2007. 154 p.
8. XAUDARÓ, C. *Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales*. Tesis de Ingeniero Naval. Facultad de Náutica de Barcelona, 2011. 97 p.