



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ENERGÍA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DE
HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE EN
MÁQUINAS DE COMBUSTIÓN INTERNA PARA
GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

CAMPO DE CONOCIMIENTO ENERGÍA –
CAMPO DISCIPLINARIO ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

P R E S E N T A :

MARCO ANTONIO ROJAS MENA



TUTOR:
DR. ARTURO FERNÁNDEZ MADRIGAL

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Ulises Cano Castillo**

Secretario: **Dr. Arturo Fernández Madrigal**

Vocal: **Dr. Fabio Manzini Poli**

1^{er.} Suplente: **Dr. Luis Gerardo Arriaga Hurtado**

2^{do.} Suplente: **Dr. Oscar Adolfo Jaramillo Salgado**

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ENERGÍA

TUTOR DE TESIS:

DR. ARTURO FERNÁNDEZ MADRIGAL

FIRMA

Índice

	Página
Resumen	i
Objetivo	iii
Hipótesis	iv
Capítulo I. El Hidrógeno: Una Alternativa A Los Combustibles Convencionales	
1.1 El cambio climático global	2
1.1.1 Las evidencias observadas	2
1.1.2 El contexto de México.	3
1.2 Sistema eléctrico mexicano.	4
1.2.1 Capacidad efectiva de generación.	4
1.2.2 Generación bruta de electricidad.	5
1.2.3 Emisiones del sector eléctrico.	5
1.3 La alternativa: máquinas de combustión interna a hidrógeno.	7
1.3.1 La contaminación por combustión de motores.	7
1.3.2 El hidrogeno como combustible	8
1.4 Historia del hidrógeno como combustible	10
Referencias	
Capítulo II. Tipos de Motores y su Operación	
2.1 Parámetros importantes.	25
2.1.1 Procesos.	25
2.1.2 Máquinas térmicas.	27
2.1.3 Diagramas P/V y T/S	27
2.1.4 Presión media teórica	28
2.2 Ciclos ideales termodinámicos	30
2.2.1 El ciclo de Carnot	31
2.2.2 El ciclo ideal Otto	32
2.2.3 Eficiencias para el ciclo real Otto.	35
2.2.4 Eficiencia del ciclo del aire.	36
2.2.5 Eficiencia de un gas real.	37
2.2.6 Eficiencia indicada	37

Índice

	Página
2.2.7 El ciclo ideal Diesel.	38
2.2.8 El ciclo ideal Brayton	39
2.3 Un ciclo más realista.	41
2.3.1 Pérdida por tiempo	41
2.3.2 Pérdida de calor.	42
2.3.3 Pérdida de potencia por expulsión de gases	42
2.3.4 Otras pérdidas	42
2.4 Golpeteo	43
2.5 Presiones efectivas medias	44
2.5.1 Presión efectiva media de freno	45
2.5.2 Presión efectiva media indicada	45
2.6 Comparación entre los motores de ignición por chispa y los de ignición por compresión	45
2.7 Investigación de Experimentos Realizados.	47
2.7.1 Experimentos de conversión de un motor a gasolina para que funcione con hidrógeno	47
2.7.2 Experimentos de conversión de un motor a gasolina para que funcione con mezcla de gasolina o etanol e hidrógeno	49
2.7.3 Experimentos de conversión de un motor a diesel para que funcione con hidrógeno.	51
2.7.4 Experimento de conversión de un motor a diesel para que funcione con mezcla de diesel e hidrógeno	52
2.7.5 Experimentos realizados con un motor de ignición por chispa para que funcione con mezclas de gas natural e hidrógeno.	54
2.7.6 Experimentos de conversión de una turbina a gas natural para que funcione con hidrógeno o con mezclas de hidrógeno.	55
Referencias	
 Capítulo III. Resultados	
3.1 Algunas propiedades relevantes del hidrógeno.	60
3.2 El hidrógeno impulsando aplicaciones en motores.	61
3.3 Elementos de un motor de combustión interna que deberán modificarse para que funcionen con hidrógeno como combustible.	63
3.3.1 Elementos del bloque del motor que deben ser modificados.	63
3.3.1.1 Características positivas del hidrógeno en aplicaciones en motores.	63

Índice

	Página
3.3.1.2 Algunas limitaciones asociadas con la aplicación del hidrógeno en el bloque del motor.	66
3.3.1.3 Algunas medidas para mejorar las características operativas del bloque de motores a hidrógeno de ignición por chispa.	66
3.3.2 Sistema de inyección de combustible.	69
3.3.2.1 Características positivas del hidrógeno en aplicaciones en el sistema de inyección de combustible de motores.	71
3.3.2.2 Algunas limitaciones asociadas con la aplicación del hidrógeno en el sistema de inyección de combustible de motores.	72
3.3.2.3 Algunas medidas para mejorar las características operativas en el sistema de inyección de combustible de motores a hidrógeno de ignición por chispa.	73
3.3.3 Sistema de almacenamiento de combustible	75
3.3.3.1 Gas a alta presión	76
3.3.3.2 Comparación entre varios sistemas de almacenamiento de combustible.	77
3.3.4 Sistema de ignición de combustible	78
3.3.5 Sistema de control de emisiones.	80
3.3.6 Aspectos de seguridad en la utilización del hidrógeno	83
Referencias	85
 Capítulo IV. CONCLUSIONES	
4.1 Principio de Generación de Energía Eléctrica.	86
4.2 Sistema Eléctrico Centralizado.	87
4.2.1 Iniciativa para la Investigación de la producción Integrada de Hidrógeno, electricidad y secuestro de carbono FutureGen.	88
4.2.2 Turbinas a hidrógeno.	90
4.2.3 Desarrollo de materiales	90
4.3 Sistema Eléctrico Distribuido.	91
4.3.1 Definición de Generación Eléctrica Distribuida.	92
4.3.2 Tecnologías de generación distribuida.	92
4.3.3 Generación distribuida con almacenamiento de hidrógeno y generación de electricidad con motores de combustión interna.	93
4.3.3.1 Costo unitario agregado	94
4.3.3.2 Análisis del almacenamiento de energía con hidrógeno y generación de electricidad con motores de combustión interna.	95

Índice

	Página
4.3.4 Estaciones de generación de Energía Eléctrica con Hidrógeno.	99
4.4 Conclusiones.	105

Índice de Gráficas

	Página
1.1 Capacidad efectiva de generación por tipo de tecnología en México, datos de informes de labores de C.F.E.	4
1.2 Generación bruta por tipo en México (MWh), elaborado con datos de C.F.E.	5
1.3 Emisiones de bióxido de carbono en teragramos asociados al consumo de combustible fósiles en el sector eléctrico mexicano.	6
4.1 Costo unitario agregado global y por horario.	95
4.2 Relación de electricidad en horario base y horario punta para varios escenarios.	96
4.3 Relación de precio por kWh respecto a horario base para varios escenarios.	97
4.4 Precio por kWh para varios escenarios.	98

Índice de Tablas

	Página
2.1 Caracterización comparativa de los motores de encendido por chispa y los de encendido por compresión	46
2.2 Resumen de motores a gasolina convertidos a hidrógeno.	48
2.3 Resumen de motores a gasolina adaptados para utilizar mezclas de hidrógeno.	50
2.4 Resumen de conversión de motores diesel a hidrógeno	51
2.5 Resumen de motores diesel adaptados para utilizar mezclas de hidrógeno	53
2.6 Resumen de conversión de un motor de ignición por chispa para que funcione con mezclas de gas natural e hidrógeno.	54
2.7 Resumen de conversión de una turbina a gas natural para que funcione con hidrógeno o con mezclas de hidrógeno	56
3.1 Algunas Propiedades Comparativas Del Hidrógeno, Metano E Iso-Octano.	60
3.2 Algunas propiedades de combustión comparativas del hidrógeno, metano y gasolina.	61
3.3 Comparación de cilindros a alta presión para almacenar Hidrógeno.	78

4.1	Escenarios de la eficiencia global de un módulo de energía con almacenamiento de H ₂	96
4.2	Estado del Arte de Estaciones de generación de Energía Eléctrica con Hidrógeno.	99

Índice de Figuras

	Página	
1.1	Camioneta prototipo a hidrógeno	10
1.2	Tractor con celda de combustible	11
1.3	Gremlin operada con hidrógeno suministrado desde un tanque a bordo . . .	11
1.4	Tupolev TU-154	12
1.5	Ford U.	13
1.6	Ford Focus Wagon-ZTW	13
1.7	Ford Focus de 2.0 L.	14
1.8	Ovonic H ₂ Prius.	14
1.9	BMW 750HL.	15
1.10	Motor rotatorio	15
1.11	Toyota Prius modelo 2002	16
1.12	Ford Focus C-MAX	16
1.13	H2R.	17
1.14	GM Hummer H2H	17
1.15	Auto mini de transporte Peugeot.	18
1.16	GAZ H2-Van.	18
1.17	Quantum H2-Prius.	19
1.18	Mitsubishi Nessie	19
1.19	Premacy H2 RE hybrid.	20
1.20	Kia SIDEWINDER.	20
1.21	F-250 Super Chief tri-fuel truck	21
1.22	Mazda RX-8 Hydrogen RE.	22
1.23	Versión ligera del Fiat Panda	22
1.24	GMC Truck Silverado a hidrógeno.	23
2.1	Proceso de compresión de un gas	26
2.2	Ciclo termodinámico representado en un diagrama <i>P/V</i>	28
2.3	Diagrama <i>T/S</i> de un ciclo termodinámico.	28

Índice de Figuras

	Página
2.4 Presión media teórica	29
2.5 Diagrama P/V con todos los posibles procesos adiabáticos a presión constante y volumen constante	29
2.6 Ciclo de Carnot representado en los diagramas P/S y T/S	31
2.7 Motor de combustión por chispa (Bujía)	32
2.8 Ciclo de Otto en coordenadas P/V y T/S	33
2.9 Ciclo Otto ideal.	36
2.10 Ciclo Diesel en coordenadas P/V y T/S	38
2.11 Diagrama P/V y T/S del ciclo Brayton.	40
2.12 Diagrama P/V donde se ha sobrepuesto el ciclo Otto real sobre el ideal . . .	41
3.1 Los cuatro tiempos de un motor de ignición por chispa y algunos de sus elementos.	62
3.2 Variaciones típicas en la salida de potencia indicada y en la eficiencia con cambios en la relación de compresión cuando se usa el tiempo de encendido óptimo para la frontera sin golpeteo	64
3.3 Variaciones típicas en la presión máxima en el cilindro con cambios en la relación equivalente cuando la operación sobre un rango de mezclas de combustible de hidrógeno y metano para dos diferentes grados de encendido antes del punto muerto superior (APMS)	65
3.4 Variaciones de los límites de operación para la ignición y el golpeteo con cambios en la relación de compresión para la operación con hidrógeno a condiciones ambientales en la admisión.	66
3.5 Ubicación de Elementos que se han modificados en el interior del cilindro.	67
3.6 Un detalle del accionamiento de las válvulas.	68
3.7 Sistemas PCV y de admisión.	69
3.8 Variaciones de los límites de operación con cambios en la relación de compresión para diferentes combustibles gaseosos a 900 rpm.	71
3.9 Variaciones típicas en la salida de potencia indicada y en la eficiencia de la operación con relación equivalente pobre de hidrógeno usando tiempo de encendido de chispa óptimo.	71
3.10 Volumen de la Cámara de combustión y comparación de energía para motores a gasolina e hidrógeno.	74
3.11 Comparación de Almacenamiento, Volumen y Peso de varios combustibles cada uno con 1,044.5 MJ de energía almacenada	76
3.12 Comparación Volumétrica, Gravimétrica y de Costos de varios sistemas	77

Índice de Figuras

	Página
de almacenamiento de Hidrógeno.	
3.13 Variaciones típicas en el tiempo de encendido (en ° de cigüeñal APMS) y la ausencia de golpeteo para operación con mezcla pobre de hidrógeno. . .	79
3.14 Emisiones de un motor a hidrógeno	81
3.15 Emisiones de un motor a gasolina	82
4.1 Relación de los componentes en un ciclo combinado integrado de gasificación y secuestro de carbono de la iniciativa FutureGen.	88
4.2 Tecnologías de Generación Distribuida	93
4.3 Periodo de Verano, del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre.	94
4.4 Periodo de Invierno: del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril.	94
4.5 Generador Eléctrico de 7 kW alimentado con H ₂ O gasolina	100
4.6 Diagrama del proyecto eólico-hidrógeno en Ustira, Noruega.	101
4.7 Módulo de 250 kW con 5 unidades de 60 kW del HEC.	102
4.8 Módulo Ecostar de 91.2 kW	103
4.9 Generador de 125 kW alimentado con Hythane.	103
4.10 Modulo de energía de 125 kW de Stuart Energy	104

Tesis: Estudio de Factibilidad del Uso de Hidrógeno como Combustible en Máquinas de Combustión Interna para Generación de Electricidad.

Resumen

Se presenta en este trabajo la propuesta de utilizar hidrógeno como combustible en centrales de generación de electricidad que queman combustibles fósiles en máquinas de combustión interna, con el objetivo de disminuir las emisiones contaminantes a corto plazo y de adquirir experiencia en el manejo y uso del hidrógeno en el sector eléctrico permitiendo la transición a una tecnología más eficiente y sustentable a largo plazo.

En el primer capítulo se estudia el sector eléctrico mexicano y las emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera que resultan del uso de combustibles fósiles, se estudia el mecanismo de combustión de los hidrocarburos y se plantea la alternativa del hidrógeno; un combustible, cuya combustión produce mucho menos emisiones y que pueden ser compatible con la actual infraestructura de generación eléctrica. Se incluye la historia del hidrógeno como combustible y su aplicación en el tiempo en motores de combustión interna hasta nuestros días.

En el segundo capítulo se identifican las máquinas de combustión interna utilizadas en el sector eléctrico mexicano, se hace una revisión de algunos parámetros básicos y de los ciclos termodinámicos que describen su funcionamiento: entre los que se encuentran los ciclos ideales Otto, Diesel y Brayton. Se revisó la definición de la eficiencia para cada ciclo y las pérdidas que experimenta un motor de combustión interna y que hacen que disminuya su eficiencia. Se hizo una comparación entre los motores de ignición por chispa y los de ignición por compresión para determinar sus semejanzas y diferencias. Se investigó en la literatura existente los esfuerzos que se han hecho para aplicar gradualmente el hidrógeno como combustible en máquinas de combustión interna, identificando los combustibles utilizados, las modificaciones hechas, los resultados obtenidos en cuanto a comportamiento de la máquina y sus emisiones. Los experimentos encontrados se dividieron en seis categorías:

1. Conversión de un motor a gasolina para que funcione con hidrógeno.
2. Conversión de un motor a gasolina para que funcione con mezcla de gasolina o etanol e hidrógeno.
3. Conversión de un motor a diesel para que funcione con hidrógeno.
4. Conversión de un motor a diesel para que funcione con mezcla de diesel e hidrógeno.
5. Experimentos realizados con un motor de ignición por chispa para que funcione con mezclas de gas natural e hidrógeno.
6. Experimentos de conversión de una turbina a gas natural para que funcione con hidrógeno o con mezclas de hidrógeno.

En el tercer capítulo se muestran las propiedades del hidrógeno como combustible, se comenta la influencia positiva y negativa del uso de hidrógeno en los diferentes subsistemas del motor de combustión interna de ignición por chispa y se identificó a los elementos de un motor que deben ser modificados para que se utilice hidrógeno como combustible y se asegure una operación confiable, dividiéndose en:

- a. Elementos del bloque del motor.
- b. Sistema de inyección de combustible.

- c. Sistema de almacenamiento de combustible.
- d. Sistema de ignición del combustible.
- e. Sistema del control de emisiones.
- f. Aspectos de seguridad en la utilización del hidrógeno.

Se estudiaron los cocientes aire-combustible para mezclas combustibles de hidrógeno y como compararlas con otros combustibles. Los problemas típicos de pre-ignición encontrados en un motor de combustión interna a hidrógeno. Los tipos de sistemas de ignición que pueden ser usados en un motor de combustión interna a hidrógeno. La ventilación del motor que permita el uso del hidrógeno en un motor de combustión interna. El tipo de emisiones asociadas con motores de combustión interna a hidrógeno. La salida de potencia de motores de combustión interna a hidrógeno. Se encontró que para cada uno de los subsistemas se tiene un rango de valores bien definidos en los que el motor se desempeña bien y cuando se opera fuera de estos valores encontrados su funcionamiento es muy irregular. Por lo que las gráficas que se muestran son una guía útil para la conversión de un motor a hidrógeno.

Por su parte en el cuarto capítulo se exponen el principio de generación de energía eléctrica, la definición de un sistema de generación eléctrica centralizada, se comenta una iniciativa para utilizar hidrógeno a gran escala en una planta para la producción integrada de hidrógeno, electricidad y secuestro de carbono, se mencionan los esfuerzos que se realizan para implementar esta tecnología a mediano plazo. Adicionalmente, se define la generación eléctrica distribuida y se plantea un nicho de aplicación en generación distribuida con almacenamiento de hidrógeno y generación de electricidad con motores de combustión interna. Se da una serie de ejemplos de estaciones de generación de energía eléctrica que algunos fabricantes ofrecen como un producto que utiliza hidrógeno para obtener electricidad por medio de un motor de combustión interna. Finalmente se presentan las conclusiones a las que se llegó en este trabajo, entre las que se incluyen:

- i. La necesidad de una normativa que restrinja aún más las emisiones contaminantes de las plantas de generación de electricidad y que impulse la aplicación de tecnologías más limpias como la del hidrógeno.
- ii. La tecnología actual no permite que el mismo motor de combustión interna de un estación de generación se pueda seguir utilizando al convertirse a hidrógeno. Por lo que se recomienda utilizar un motor prácticamente del doble de potencia que al convertirse a hidrógeno se ajustará a la capacidad del original, en tanto se alcanza la madurez de la tecnología que permita conservar el mismo motor.

Objetivo General

El principal objetivo de este trabajo es el realizar un análisis acerca de las máquinas de combustión interna utilizadas como fuentes de potencia en conjunto con generadores eléctricos para obtener electricidad, en el sector eléctrico. Dicho análisis contempla la realización de modificaciones para cambiar el combustible para el que fueron diseñadas, por el de hidrógeno, identificando, adicionalmente las adaptaciones necesarias para el cambio de combustible. Lo anterior para disminuir las emisiones contaminantes en el sector eléctrico a corto plazo y adquirir experiencia en el manejo y uso del hidrógeno en el sector eléctrico permitiendo la transición a una tecnología más eficiente y sustentable a largo plazo.

Objetivos Particulares

Estudiar la influencia del uso de los combustibles fósiles en máquinas de combustión interna para la generación de electricidad en el sector eléctrico mexicano para conocer cuales son los impactos (las emisiones) que representan su uso.

Identificar los tipos de motores de combustión interna que se utilizan en el sector eléctrico mexicano, estudiando el ciclo termodinámico que los caracteriza y explica las pérdidas que hacen que su eficiencia disminuya.

Investigar en la literatura existente los esfuerzos que se han hecho para aplicar gradualmente el hidrógeno como combustible en máquinas de combustión interna, identificando los combustibles utilizados, las modificaciones hechas, los resultados obtenidos en cuanto a comportamiento de la máquina y sus emisiones.

Proponer un esquema adecuado en el que el hidrógeno pueda ser utilizado como combustible en máquinas de combustión interna para generar energía eléctrica de forma confiable y con bajas emisiones, aprovechando la infraestructura existente.

Realizar un estudio técnico de las ventajas que ofrece el generar energía eléctrica con máquinas de combustión interna alimentadas con hidrógeno.

Hipótesis

Técnica y tecnológicamente es factible que las actuales máquinas de combustión interna utilizadas en la generación de electricidad, utilicen hidrógeno como combustible para disminuir sus emisiones, sin repercusión drástica en su configuración, ni en su operación diaria, siendo la única limitante a ésta conversión la falta de infraestructura y disponibilidad del combustible.

CAPITULO I

EL HIDRÓGENO: UNA ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES CONVENCIONALES

Introducción.

Nuestro ambiente esta cambiando considerablemente, la percepción que se tiene es que las estaciones no se comportan de forma regular, podemos advertir que hace más calor en temporada de verano y se siente más frío en invierno y si se preguntará que es lo que esta sucediendo, se tendría que pensar en las actividades que realizamos y como cada una de ellas requiere de cierto grado de consumo de energía, ya sea, para el baño, la preparación de alimentos, el transportarse a algún sitio, etcétera. Esta energía no es gratuita ni en el sentido económico ni el ambiental puesto que para obtener recursos energéticos hay que extraerlos desde donde se encuentren y esto conlleva su propio consumo de energía, sin embargo, los combustibles y otras formas de energía son disponibles hoy, hasta cierto punto, de forma barata y abundante lo que ha contribuido a que su consumo se dispare y con ello disminuya su disponibilidad, aumenten las emisiones asociadas a su consumo, se impacte negativamente la composición de los gases de la atmósfera.

Los vectores energéticos dominantes en la segunda mitad del siglo XXI serán el hidrógeno y la electricidad, mutuamente complementarios. A partir del primero se puede obtener la segunda y viceversa. La electricidad se puede conseguir a partir del hidrógeno en generadores de combustión interna, turbinas y celdas de combustible, y, de la misma forma, el hidrógeno se puede obtener a partir de la electricidad mediante la electrólisis del agua. Este conjunto cumple las dos condiciones necesarias de un sistema energético sostenible, un esquema de almacenamiento de energía y un producto energético que puede transportarse a largas distancias.

Otra utilización ventajosa es la producción de hidrógeno como sistema de gestión de la demanda eléctrica, de manera que en los períodos en que ésta es inferior a la producción, los excedentes se utilicen para producir hidrógeno que pueda ser utilizado como combustible en períodos de demanda alta.

Desde el punto de vista ambiental, la ventaja de la electricidad y del hidrógeno frente al uso de los hidrocarburos es la limpieza de su empleo en los puntos de consumo. La electricidad no produce emisiones peligrosas y el hidrógeno sólo produce agua como subproducto. Adicionalmente, ambos productos son totalmente renovables. La electricidad vista como una separación de cargas eléctricas, regresa a un estado eléctricamente neutro después de ser usada. El hidrógeno se convierte en agua.

Desde un punto de vista estratégico, lo que hace más interesante a esta combinación es la diversidad de fuentes a partir de las cuales puede producirse.

En el caso de la electricidad, aparte de las cinco fuentes tradicionales –carbón, nuclear, petróleo, gas y energía hidráulica– es razonable que en el futuro se pueda obtener económicamente con las nuevas fuentes de energía –solar, biomasa, eólica, hidrógeno, etc.–. En el caso del hidrógeno, su producción actual se basa, principalmente, en el reformado de gas natural o de otros hidrocarburos. Sin embargo, el hidrógeno puede obtenerse de una gran variedad de fuentes.

1.1 El cambio climático global

Los aumentos en la concentración de los llamados gases de efecto invernadero reducen la eficiencia con la cual la Tierra re-emite la energía recibida al espacio. Parte de la radiación saliente de onda larga emitida por la Tierra al espacio es re-emitada a la superficie por la presencia de esos gases. Así, la temperatura de superficie se elevará para emitir más energía, y aunque parte de ella quede “atrapada”, suficiente energía saldrá al espacio para alcanzar el balance radiativo que mantiene relativamente estable el clima. Es claro, si las concentraciones de gases efecto invernadero continúan aumentando, la temperatura de superficie del planeta mantendrá una tendencia positiva. Aun si las emisiones de estos gases se estabilizan, los efectos del calentamiento perdurarán mucho tiempo, pues los gases de este tipo tienden a permanecer por muchos años en la atmósfera.

1.1.1 Las evidencias observadas

Los trabajos realizados hasta finales del siglo XX dan cuenta de cambios en diferentes variables que caracterizan el clima. Hoy en día no queda duda de que la temperatura global del planeta está aumentando y de que los regímenes de lluvia están cambiando. Si bien es cierto que en escalas de tiempo de miles o millones de años las concentraciones en gases de efecto invernadero cambiaron considerablemente de manera natural, produciendo sustanciales variaciones en la temperatura, éstas se produjeron en muchos millones de años. Incluso los ciclos de las glaciaciones (salir de periodos glaciales) en el planeta requieren de miles de años. Nunca como ahora, cambios tan drásticos en el clima se produjeron en escalas tan cortas de tiempo (décadas). De mediados del siglo XIX a la fecha, la actividad humana ha resultado en aumentos globales de la temperatura del orden de $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ [1].

El bióxido de carbono (CO_2) ha sido un componente muy importante de nuestra atmósfera desde hace miles de millones de años, cuando la gran actividad volcánica del planeta lo lanzaba a la atmósfera. La atmósfera primitiva era más rica en bióxido de carbono –aproximadamente una concentración de 3% contra 0.036% en la actualidad– y evitaba la salida de radiación, produciendo, junto con el vapor de agua, un calentamiento global en el planeta [2]. La importancia del CO_2 y el vapor de agua en la atmósfera para la regulación de la temperatura del planeta es tal que sin su presencia la temperatura promedio actual del planeta sería aproximadamente 33°C más fría y, por lo tanto, el planeta estaría congelado [3].

Otro componente natural del ciclo del carbono lo constituye el metano (CH_4). Este gas es, después del bióxido de carbono, el compuesto de carbono más abundante en la atmósfera [3]. Se produce por la fermentación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, tal como ocurre, por ejemplo, en los humedales, los sedimentos lacustres y en el aparato digestivo de los rumiantes y las termitas. La concentración de metano muestra variaciones latitudinales, es mayor en el hemisferio Norte que en el Sur y fuertes oscilaciones con las estaciones del año. Tiene una capacidad de absorción de radiación infrarroja 20 veces mayor por molécula que el bióxido de carbono [4], por lo que el aumento de la concentración de este gas en la troposfera tiene también el potencial para contribuir de manera significativa a un cambio climático global.

El aumento en las concentraciones de bióxido de carbono y de metano en la parte baja de la atmósfera (troposfera), está bien documentado [1]. Las mediciones realizadas en Mauna Loa, Hawai,

desde 1957, así como las mediciones indirectas (p. ej. Con núcleos de hielo), han mostrado un aumento de la concentración atmosférica de CO₂: de 280 partes por millón (ppm) en 1750 a 367 ppm en 1999. Esto significa un incremento de 31% en poco más de 100 años. Aunque se han documentado concentraciones similares a la actual en el registro geológico, ésta constituye el nivel más alto alcanzado en los últimos 420 mil años, y la velocidad de cambio no parece tener precedente en los últimos 20 mil años [1]. La concentración de metano en la atmósfera, que es mucho más baja que la de CO₂, aumentó de cerca de 700 partes por billón (ppb) en 1750 a 1745 ppb en 1998, lo que representó un aumento del 150%. Esta concentración no ha sido excedida en los últimos 420 mil años. Las causas del incremento de la concentración de gases de carbono en la atmósfera están bien identificadas. En el caso del CO₂ son el uso industrial y doméstico de combustibles que contienen carbono (petróleo, carbón, gas natural y leña), la deforestación –que provoca la descomposición de la materia orgánica– y la quema de la biomasa vegetal. En el caso del metano son la agricultura (p. ej. Cultivo de arroz), el uso de gas natural, los rellenos sanitarios, el aumento del hato ganadero y la quema de la biomasa vegetal. Sin embargo, es el uso indiscriminado e ineficiente de los combustibles fósiles el principal generador de la tendencia actual [1].

1.1.2 El contexto de México

México es el país de Latinoamérica con las mayores emisiones de CO₂ y contribuye con cerca del 1.0% de las emisiones mundiales [5].

Las principales causas de emisiones de CO₂ a la atmósfera son la quema de combustibles fósiles para generar electricidad y asociada al transporte, la producción de cemento y la quema de biomasa debida a la deforestación y al cambio de uso del suelo. Los otros gases de invernadero, aunque emitidos en menor cantidad, son importantes debido a su efecto combinado de retención de calor y tiempo de permanencia en la atmósfera. Estos y otros contaminantes son ya un problema en ciertas regiones del país como la del Valle de México y en ciudades como Guadalajara o Monterrey, donde se conjuga una suerte de condiciones geográficas que impiden que se limpien los contaminantes de la atmósfera, una densidad poblacional alta y un consumo alto de energía proveniente de hidrocarburos. Por lo que es necesario emplear combustibles alternativos como el hidrógeno que contaminan menos en el proceso de su utilización.

Entre 1994 y 1998 se incrementaron en el país las emisiones de casi todos los gases de invernadero, resaltando por su importancia en volumen las de CO₂, que aumentaron un 12.3%, y las del CH₄ con un 22.2%. Las emisiones de CO y compuestos orgánicos volátiles se redujeron en más del 20% en el mismo periodo [5].

El sector de generación de electricidad en México es responsable de emitir al ambiente más del 40% [5] del Bióxido de carbono emitido por la quema de combustibles fósiles para generar electricidad, puesto que más del 72% [6] de la electricidad que se generó tan solo en el 2004 se produjo quemando combustible fósiles.

Se tiene planeado satisfacer la mayor parte de la demanda futura de electricidad a corto y mediano plazo con la construcción de plantas que quemem combustibles fósiles con el consecuente aumento de emisiones de gases de efecto invernadero.

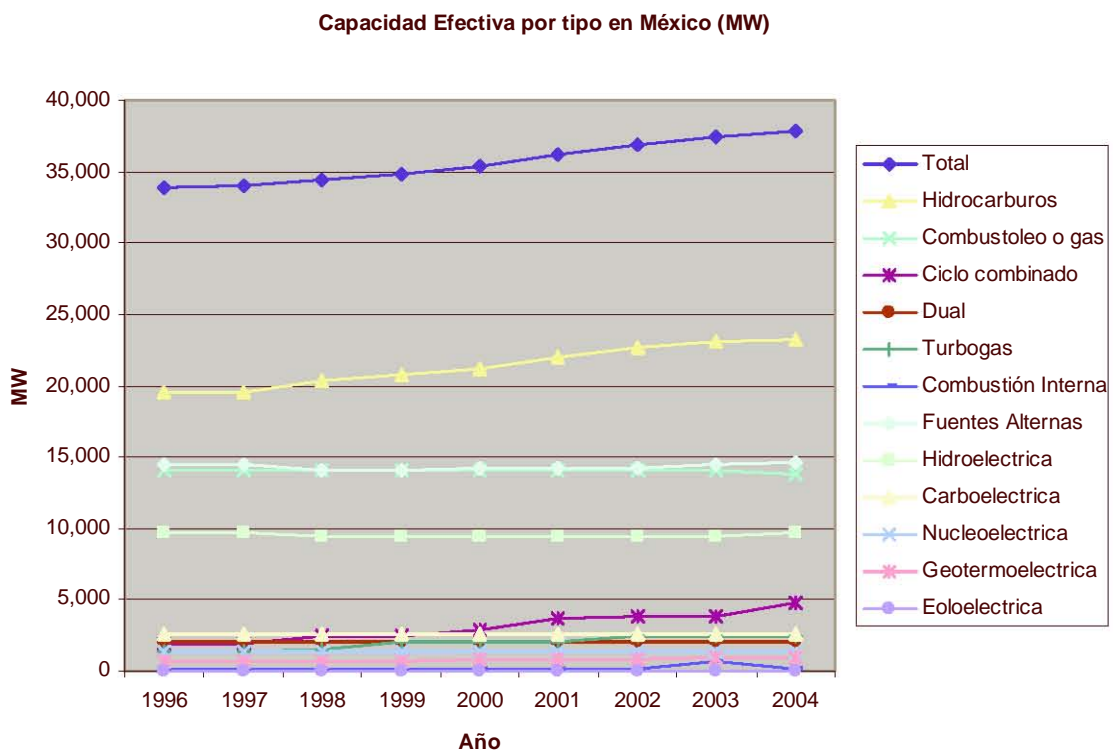
1.2 Sistema eléctrico mexicano

El sistema eléctrico mexicano es un sistema que opera –casi en su totalidad– con grandes centrales que alimentan a una red nacional. Estas son centrales que llegan a tener capacidades de 2 millones de kW.

La diversificación energética es una necesidad estratégica. De la misma manera que no es recomendable concentrar capacidad en unas cuantas plantas mayores, tampoco lo es el depender de una variedad limitada de fuentes de energía. México actualmente depende de combustibles fósiles para el 75% de su generación de electricidad y lo único que está haciendo en la actualidad es pasar de una dependencia del petróleo a una dependencia del gas natural. A continuación se hace una descripción de la actual situación de generación de electricidad en México.

1.2.1 Capacidad efectiva de generación

La capacidad efectiva de generación de electricidad se concentra en centrales impulsadas por hidrocarburos cuya capacidad ha crecido de 1996 al 2004 en poco más del 19%; sin contar que los productores independientes de energía que al 2004 contaban con 7,264.9 MW de capacidad efectiva, mientras que las centrales de fuentes alternas han aumentado su capacidad en el mismo periodo en poco más de 1% [6], es decir, casi 16 veces menos que las centrales de hidrocarburos, como se observa gráfica 1.1.

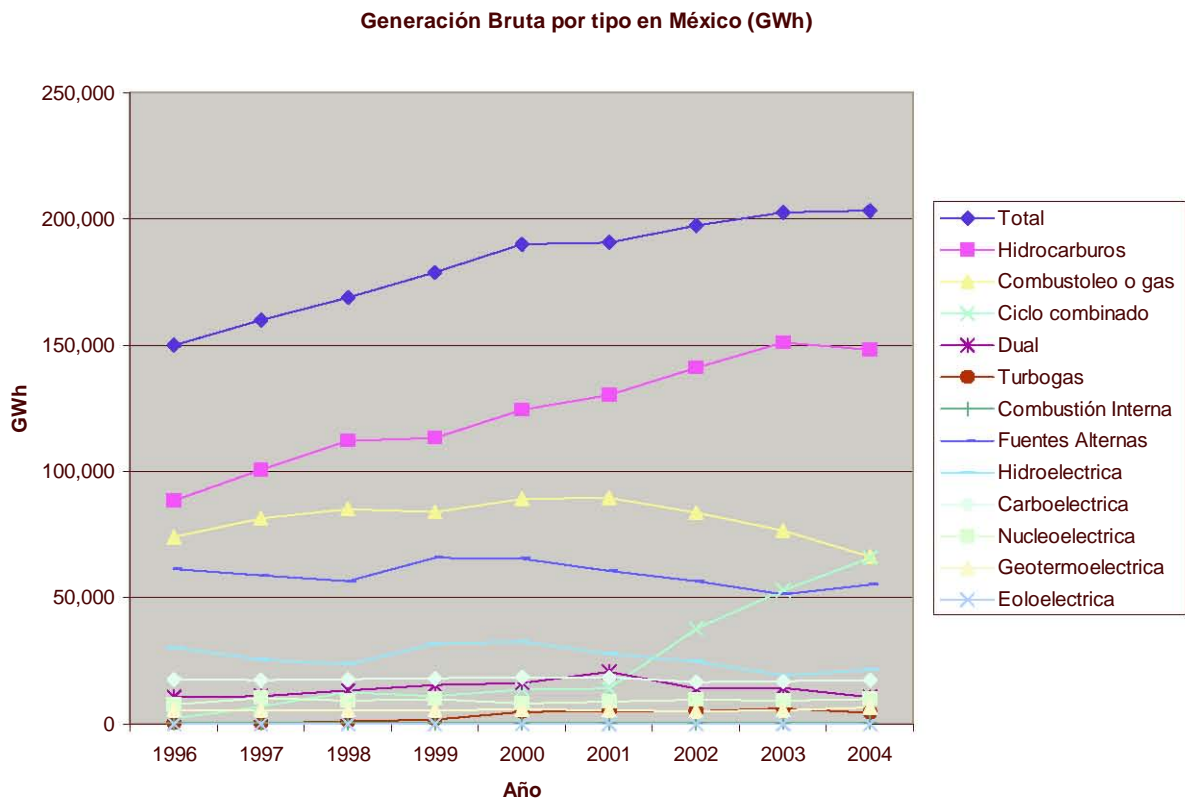


Gráfica 1.1 Capacidad efectiva de generación por tipo de tecnología en México, datos de informes de labores de CFE.

1.2.2 Generación bruta de electricidad

La generación de energía en México se ha hecho con plantas más eficientes en los últimos años, como las de ciclo combinado cuya eficiencia está en un rango entre 51.01% y 51.82%, que ha sustituido a plantas generadoras térmicas convencionales cuya eficiencia está en un rango entre 30.63% y 37.56%, disminuyendo así el consumo de combustóleo y sus emisiones asociadas.[9]

Por su parte la generación bruta de electricidad en México ha crecido de 1996 al 2004 en poco más del 67% en centrales de hidrocarburos mientras que las centrales de fuentes alternas han disminuido su generación en el mismo periodo en más de 10% [6] como se muestra en la Gráfica 1.2.



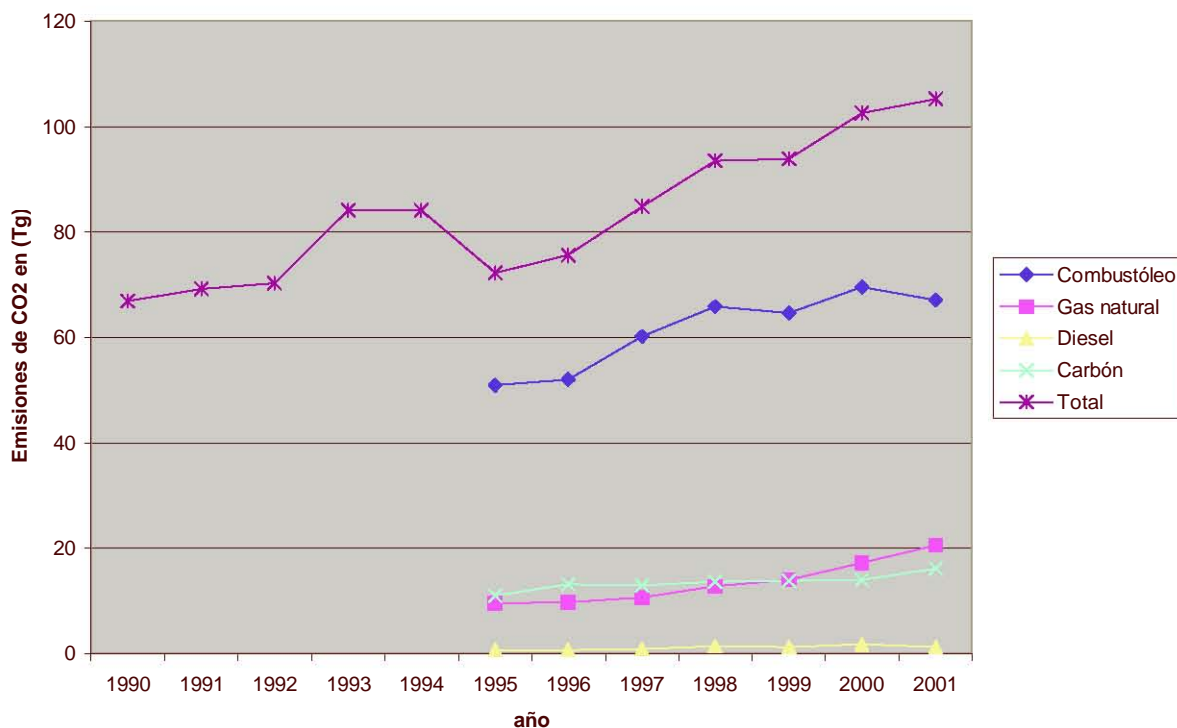
Gráfica 1.2 Generación bruta por tipo en México (MWh), elaborada con datos de la CFE.

1.2.3. Emisiones del sector eléctrico

Así mismo las emisiones vinculadas a este sector, por ejemplo las de Bióxido de carbono, han aumentado de 1990 al 2001 en más del 57% [5,6,7] como se indica en la Gráfica 1.3.

Existen 15 países que contribuyen con 71.4% de las emisiones de CO₂ mundiales por quema de combustibles fósiles; entre ellos se encuentra México en la posición 12, con 98 millones de toneladas de carbono, que representa 1.54%. Al considerar a México en el contexto de América Latina y El Caribe, nuestro país contribuye con 27.3% de las emisiones, con un índice de 1.1 toneladas de carbono por habitante por año [8].

Emisiones de CO2 asociadas al consumo de Combustibles en el Sector Eléctrico (Tg)



Gráfica 1.3 *Emisiones de bióxido de carbono en teragramos asociadas al consumo de combustible fósiles en el sector eléctrico Mexicano.*

Este crecimiento de las plantas de generación de electricidad que utilizan hidrocarburos y particularmente las plantas de ciclo combinado que utilizan gas natural, han sido seleccionadas por CFE, tomando como mayor factor de decisión el menor costo de producción de electricidad, criterio que en su momento se apoyo en el hecho de que el gas natural registraba un precio bajo, mismo que hoy día se ha incrementado sensiblemente hasta el punto que el precio de referencia del gas natural importado (US \$ 6.31/MMBTU) [10] para el 2006 es 37.5% más alto, en el mejor de los casos, al planeado por CFE (US \$ 4.59/MMBTU) [9]. Los datos publicados por la Agencia Internacional de Energía, que deben provenir de México, dicen lo contrario: es más barato el kilovatio-hora generado por combustóleo con alto contenido de azufre que el generado con gas natural. Y considerando que hay varios medios técnicos para evitar las emisiones de compuestos de azufre, con cuyo costo sigue siendo más barato generar con combustóleo [11].

En el año 2005 el subsidio que el gobierno federal transfirió a CFE y LyFC sumó 6 mil millones de dólares y este año para evitar que los usuarios de energía eléctrica del país paguen tarifas más altas, el gobierno federal entregará un subsidio equivalente a 10 mil millones de dólares, el más alto de la historia del país. Los planes de crecimiento de ambas paraestatales se mantienen relativamente estables en términos de la adición de nuevos clientes, lo que sugiere que el mayor subsidio no obedece al crecimiento de la base de usuarios o por una mayor cobertura del servicio.

La inestabilidad del mercado petrolero internacional en 2005 afectó el desempeño de las paraestatales debido al encarecimiento de los combustibles que emplean para generar electricidad, gas natural, el carbón y el diesel [12].

1.3 La alternativa: máquinas de combustión interna a hidrógeno

Ante este panorama existe la alternativa de utilizar el hidrógeno, un combustible más limpio cuya combustión produce mucho menos emisiones contaminantes y que con ciertas adaptaciones en los sistemas de generación de electricidad impulsados por combustibles fósiles puede ser empleado para generar electricidad, de forma segura, confiable y limpia. Es por ello que es importante realizar una revisión de los actuales motores de combustión interna y su adaptación a la quema de hidrogeno dentro del bloque de estos motores.

1.3.1 La Contaminación por combustión en motores

La combustión es una reacción química en la que un elemento combustible se combina con otro comburente (generalmente oxígeno en forma de O_2 gaseoso), desprendiendo calor y produciendo un óxido. Los tipos más frecuentes de combustible son los materiales orgánicos que contienen carbono e hidrógeno. El producto de esas reacciones puede incluir monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y cenizas.

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de: *combustible*. Los combustibles más conocidos se componen principalmente de: *Hidrógeno y Carbono*. Reciben el nombre de combustibles hidrocarburos y se denotan por la fórmula general C_mH_n . Existen en todas las fases ejemplo:

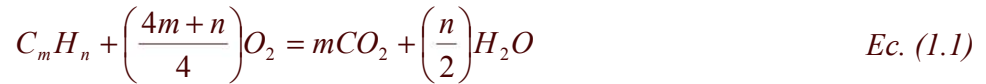
Carbón: el principal constituyente es el carbono; el cual también contiene cantidades variables de oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, azufre, humedad y ceniza.

Gasolina: es una mezcla de numerosos hidrocarburos y se obtiene del petróleo crudo. (octano C_8H_{18}).

Gas natural: está compuesto principalmente de metano, pero también contiene pequeñas cantidades de etano, propano, hidrógeno, helio, dióxido de carbono, nitrógeno, sulfato hidrógeno y vapor de agua.

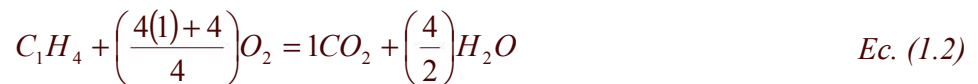
A la reacción química durante la cuál un combustible se oxida y se libera una gran cantidad de energía se le conoce como: *combustión*. La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada *combustible*, con el oxígeno. Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

La expresión general para la combustión de un combustible [13] es:

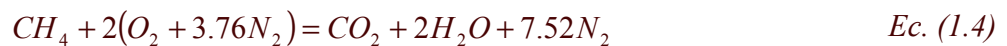


m y n = son el número de átomos de carbono e hidrógeno respectivamente en el combustible.

Por ejemplo: Un mol de metano (CH_4) requiere 2 moles de oxígeno para la combustión completa que produce un mol de dióxido de carbono y 2 moles de agua.



Si se utiliza aire, cada mol de oxígeno va acompañado por 3.76 moles N_2



Entonces se tiene que un proceso de combustión es completo si todo el carbono en el combustible se transforma en CO_2 , todo el hidrógeno se transforma en H_2O y todo el azufre (si lo hay) se transforma en SO_2 , es decir, todos los componentes combustibles del combustible se queman por completo.

Pero es difícil que los procesos de combustión reales sean completos; incluso en la presencia de exceso de aire. Por ello la única opción es medir directamente la cantidad de cada componente en los productos.

Por lo que se puede observar la contaminación que producen los motores es debida al tipo de combustible que emplean, y no depende sólo de las características del motor; pero entre más eficiente sea un motor requerirá menor cantidad de combustible por unidad de potencia entregada.

1.3.2 El hidrógeno como combustible.

Entre las características del hidrógeno como combustible, destaca que se quema al aire libre cuando hay concentraciones entre el 4 y 75% de su volumen (el gas natural lo hace entre 5.4 y 15%). La temperatura por combustión espontánea es de 858 °K, mientras que para el gas natural es de 813°K. El gas natural es mucho más explosivo (lo hace en concentraciones de 6.3% a 14%) que el hidrógeno el cual necesita concentraciones entre el 13% y el 64% [26].

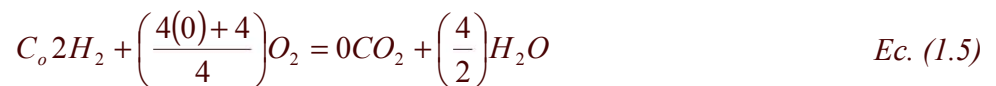
El hidrógeno requiere una importante fuente de energía para su extracción en forma energéticamente aprovechable. A diferencia del petróleo, del gas natural o del isótopo radioactivo que se consideran

fuentes de energía, el hidrógeno es un portador de energía que permite producir otra manifestación de energía (por ejemplo, electricidad, y con ella obtener energía luminosa, calorífica, etc.).

La densidad respecto al volumen de hidrógeno (2.53 kWh/l), es cuatro veces más baja que la de la gasolina (8.76 kWh/l), sin embargo la cantidad de energía en relación con el peso, la del hidrógeno es más alta. Un kilo de hidrógeno genera la misma energía que 2.1 Kg de gas natural o 2.8 Kg de gasolina. Si lo comparamos con el gas natural, entonces el hidrógeno tiene entre 33.33 kWh/kg y 39.41 kWh/kg, mientras que el gas natural menos de la mitad, es decir, entre 13.90 kWh/kg y 15.42 kWh/kg [1].

Un sistema de energía basado en hidrógeno se advierte como una opción viable y ventajosa para producir energía de alta calidad para aplicarse en una amplia gama de usos; de una manera eficiente, limpia y segura; mientras que por otro lado se resuelven los objetivos de sustentabilidad. El hidrógeno también proporciona un complemento ideal a la electricidad. Ambos son portadores de energía de alta calidad, no contienen carbón y generan poco o nada de emisiones contaminantes. La electricidad, sin embargo, está en desventaja cuando se requiere almacenarla; mientras que el hidrógeno puede satisfacer muy bien este aspecto.

Si se sustituye la composición del hidrógeno en la ecuación 1.1 se tiene:



Observado la ecuación 1.7 se entiende porque al hidrógeno se le considera un combustible limpio, al no emitir dióxido de carbono a la atmósfera.

Además la tecnología del hidrógeno plantea un fuerte vínculo con las energías renovables, puesto que puede ser obtenido por electrolisis, la cual puede realizarse mediante el uso de electrolizadores que operen con fuentes renovables de energía como el viento, celdas solares, biomasa, etc.

Por lo que es conveniente analizar técnicamente el comportamiento de las actuales fuentes de potencia, como son las máquinas de combustión interna: Motores Otto, Motores Diesel, Motores Rotatorios y Turbinas, utilizando mezclas de combustibles fósiles con Hidrógeno o utilizando el Hidrógeno como combustible, para determinar que tan compatible es este combustible con la tecnología actual e identificar que cambios se deben realizar para continuar utilizando estas máquinas en un mediano o largo plazo.

Esta propuesta serviría como un periodo de aprendizaje en el manejo y uso del hidrógeno, y una fase de transición a tecnología más eficiente como la de celda de combustible, en la cual, se enfocan muchos esfuerzos pero que no ha alcanzado la madurez necesaria para ser utilizada en forma masiva ni en un corto plazo.

1.4 Historia del hidrógeno como combustible

En 1783 el francés Antoine Laurent Lavoisier, descubrió el hidrógeno, “generador de agua”.

En 1838 el efecto de la celda de combustible, la combinación de los gases hidrógeno y oxígeno para producir agua y corriente eléctrica, fue descubierto por el químico suizo Christian Friedrich Schoenbein.

En 1845 Sir William Grove, un científico inglés, demostró el descubrimiento de Schoenbein en una escala práctica creando una “batería de gas”. Él se ganó el título del “Padre de la Celda de Combustible” por su logro.

En 1889 Ludwing Mond y Charles Langer intentaron construir el primer dispositivo de celda de combustible que usara aire y gas industrial de carbón. El dispositivo fue nombrado celda de combustible.

En 1920 el ingeniero alemán, Rudolf Erren, convirtió motores de combustión interna de camionetas, autobuses y submarinos para que utilizarán hidrógeno y mezclas de hidrógeno. Científicos británicos y el escritor Marxista, J.B.S. Haldane, introdujeron el concepto de hidrógeno renovable en su artículo Ciencia y el Futuro proponiendo que “habrá” grandes estaciones de potencia donde durante clima con viento el excedente de energía será usado para la descomposición electrolítica del agua en oxígeno e hidrógeno”.

En 1933 la Empresa Noruega Norks Hydro adaptó una camioneta prototipo para que funcionará con hidrógeno producto de la reformación de amoniaco a bordo.



Figura 1.1 *Camioneta prototipo a hidrógeno.*

En 1937 después de un exitoso vuelo trans-Atlántico de Alemania a Estados Unidos, el Hindenburg, un dirigible inflado con hidrógeno, se incendió en el aterrizaje en Lakewood, New Jersey. El misterio del incendio se resolvió en 1997. Un estudio concluyó que la explosión no se debió al gas hidrógeno, sino a una descarga eléctrica estática relacionada con el clima que encendió la cubierta de la lona plateada del dirigible que había sido tratada con ingredientes clave de un cohete de combustible sólido.

En 1958 los Estados Unidos De Norteamérica formaron la Administración Nacional de Aeronáutica Espacial (NASA por sus siglas en inglés). El programa espacial de la NASA actualmente utiliza la mayor cantidad de hidrógeno líquido en el mundo, básicamente para la propulsión de cohetes y como combustible para celdas de combustible.

En 1959 Francis T. Bacon de la Universidad de Cambridge en Inglaterra construyó la primera celda de combustible práctica a hidrógeno-aire. El sistema de 5 kW impulsó a una planta para soldar. Él nombró a su diseño de celda de combustible la “celda Bacon”. Después de más de un año, Harry Karl Ihrig, un ingeniero de Allis-Compañía de Manufactura Chalmers, demostró el primer vehículo de celda de combustible: un tractor de 20 hp. Las celdas de combustible, basadas en el diseño de Francis T. Bacon, han sido utilizadas para generar electricidad, calor y agua para los astronautas a bordo de las famosas naves espaciales Apollo y todas las subsecuentes misiones de naves espaciales.



Figura 1.2 *Tractor con celdas de combustible.*

En 1972 una Gremlin, modificada por la Universidad de California en los Ángeles, entró a la competencia de Diseño de Vehículo Urbano y ganó el primer premio por las emisiones del tubo de escape más bajas. Estudiantes convirtieron el motor de combustión interna de la Gremlin para que operara con hidrógeno suministrado desde un tanque a bordo.



Figura 1.3 *Gremlin operada con hidrógeno suministrado desde un tanque a bordo.*

En 1974 el Centro de Investigación En Energía del Hidrógeno del Instituto de Tecnología de Musashi, Japón presentó el *primer vehículo japonés impulsado con hidrógeno* el Musashi, fue un auto con un motor de cuadro tiempos, de ignición por chispa y el hidrógeno se almacenó en cilindros de alta presión.

En 1975 el Centro de Investigación En Energía del Hidrógeno del Instituto de Tecnología de Musashi, Japón participó con un auto, con un motor de cuadro tiempos, de ignición por chispa y el *hidrógeno se almacenó en forma líquida*, en el Rally SEED en USA recorriendo 2800 km.

En 1977 y 1980 el Centro de Investigación En Energía del Hidrógeno del Instituto de Tecnología de Musashi, Japón adaptó dos autos con *motor de 2 tiempos*, de ignición por chispa, inyección en el cilindro y el hidrógeno se almacenó en forma líquida.

En 1982, 1984 y 1986 el Centro de Investigación En Energía del Hidrógeno del Instituto de Tecnología de Musashi, Japón adaptó tres autos con motor de 4 tiempos el Musashi 5, 6 y 7, éste último con turbocargador, de *ignición por superficie caliente*, inyección en el cilindro y el hidrógeno se almacenó en forma líquida.

En 1988 la Oficina de Diseño Tupolev de la Unión Soviética convirtió exitosamente un jet comercial TU-154 de 164 pasajeros para que uno de los tres motores del jet operara con hidrógeno líquido. El virginal vuelo duró 21 minutos. Tupolev TU-154



Figura 1.4 *Tupolev TU-154.*

En 1990, 1994 y 1997 el Centro de Investigación En Energía del Hidrógeno del Instituto de Tecnología de Musashi, Japón adaptó tres autos con motor de 4 tiempos el Musashi 8, 9 y 10, de *ignición por chispa*, inyección en el cilindro, el Musashi 10 con inyección en el múltiple y con una unidad de control electrónica, y el hidrógeno se almacenó en forma líquida.[14]

Haciendo un resumen de los últimos tres años de presentaciones de autos conceptos tenemos que:

En Enero de 2003, se presentó un vehículo deportivo utilitario conceptual nombrado “Ford U”, con motor de combustión interna a hidrógeno de 4 cilindros, 2.3 L, transmisión híbrida eléctrica, con almacenamiento de H₂ comprimido a 70 MPa, con un consumo equivalente aproximado de gasolina de 5.2 L por cada 100 km.



Figura 1.5 *Ford U.*

En Junio del 2003, en el marco de la celebración del Centenario de Ford, se presentó un vehículo prototipo híbrido denominado Ford Focus Wagon-ZTW, que incorporó un motor de cuatro cilindros de 2.3 L súper-cargado, con un sistema de transmisión modular híbrida, un motor eléctrico de 25/10 kW y una batería de Ion-Litio, el hidrógeno se almacenó comprimido a 35 MPa.



Figura 1.6 *Ford Focus Wagon-ZTW*

En Julio de 2003, en Folkcenter, Dinamarca, el Folkecenter para Energía Renovable modificó un el motor de un Ford Focus de 2.0 L, 197 kW con gasolina, 34 kW con hidrógeno para que funcionará con gasolina e hidrógeno, almacenó 90 L de H₂ comprimido a 20 MPa, con un rango de H₂ de 90-120 km y un consumo entre 0.24-0.28 Nm³/km[15].



Figura 1.7 Ford Focus de 2.0 L

En Septiembre de 2003, en el Reto Bibendum, Ovonix Hydrogen Systems y Quantum Technologies compitieron con un Toyota Prius modificado modelo 2002 denominado "Ovonix H₂ Prius" para que funcionará como híbrido con un motor de combustión interna a H₂ y con una batería de NiMH de 276 Volts, contó con un sistema de almacenamiento de hidruros metálicos que almacenó 3 Kg. de H₂, con los que tuvo un rango de 200 km[16].



Figura 1.8 Ovonix H₂ Prius.

En Septiembre de 2003, en el Motor Show de Frankfurt, Alemania se presentó un vehículo prototipo denominado “BMW 750HL”, con un motor V12, 6 L, 170 kW @ 5,500 rpm, a gasolina e hidrógeno, con un sistema de almacenamiento 140 L de H₂ líquido[17].



Figura 1.9 BMW 750HL.

En Octubre de 2003 en el Motor Show de Tokio, se mostró un auto concepto llamado “Mazda RX8 RENESIS” con un motor rotatorio a hidrógeno y a gasolina, que inyecta el H₂ directamente en la cámara de admisión con dos inyectores controlados electrónicamente, además, con sólo tocar un botón se puede cambiar el combustible que se esté utilizando, promoviendo la versatilidad del auto en tanto la infraestructura de H₂ es desarrollada.



Figura 1.10 Motor rotatorio.

En 2004 las compañías Ovonix Hydrogen Systems, Dynetek y Quantum modificaron un Toyota Prius modelo 2002 para que funcionará como híbrido con un motor de combustión interna a H_2 y con una batería de NiMH de 276 Volts, contó con un sistema de almacenamiento de 2 tanques de hidruros metálicos de 33 L, con los que tuvo un rango de 320 km [18].



Figura 1.11 *Toyota Prius modelo 2002*

En Julio del 2004 en la Conferencia de Investigación de la Asociación Alemana de Manufactura de Autos en Stuttgart, Alemania se mostró un vehículo prototipo llamado “Ford Focus C-MAX”, que cuenta con un motor a hidrógeno de 4 cilindros, 2.3 L, 82 kW, súper-cargador que inyecta el aire al múltiple de admisión a 5.5 bar, almacena 119 L (2.75 Kg.) de H_2 en 3 tanques @ 35 MPa y tiene un rango de 200 km.



Figura 1.12 *Ford Focus C-MAX.*

En Septiembre de 2004, en Miramas, Francia, la compañía BMW probó un vehículo de carreras de alta velocidad nombrado “H2R” que cuenta con un motor de 12 cilindros, 6 L, 210 kW, que almacena hidrógeno en forma líquida, éste auto rompió 9 record, alcanzó una velocidad de 302.4 km/hr, y tuvo una aceleración de 0-100 km/hr en 6 segundos [19].



Figura 1.13 H2R.

En Octubre de 2004 en la apertura de un estación de llenado de hidrógeno en el Aeropuerto Internacional de los Ángeles, California, el gobernador de California Arnold Schwarzenegger mostró un vehículo experimental llamado “GM Hummer H2H”, que es una versión súper-cargada de un motor de combustión interna V8 VORTEC 6000 de 6 L, con una potencia 190 kW con hidrógeno, almacena 5.5 Kg. de H₂ comprimido @ 35 MPa, tiene un rango de 80 km y un consumo de 2.28 kWh / km.



Figura 1.14 GM Hummer H2H.

En 2005 el Centro Tecnológico de Investigación en Motores y Acústica de Automóviles presentó un prototipo de auto mini de transporte de carga de la marca Peugeot capaz de funcionar con gasolina e hidrógeno con un consumo entre 1.5 y 2 Kg. de hidrógeno comprimido por cada 100 km, y forma parte de un proyecto de dos años patrocinado por el Consejo Regional de Investigación y Energía de Francia que ha invertido 200 mil Euros desde Octubre del 2004 [20].



Figura 1.15 Auto mini de transporte Peugeot.

En 2005 la Asociación Nacional de Energía de Hidrógeno de Rusia (NHPA) junto con otras tres entidades presentó el prototipo de una van a hidrógeno llamada "GAZ H2-Van" con capacidad para 9 pasajeros, un motor que funciona con gasolina e hidrógeno, con 2 tanques de hidrógeno comprimido que almacenan 2 Kg. de hidrógeno en total, tiene una economía de combustible de 2 Kg. de H_2 por cada 100 km y de 6 litros de gasolina por cada 100 km, con una velocidad máxima de 120 km/h, la NHPA rusa planea probar una decena de estos vehículos e inaugurar una estación de llenado de H_2 . [21]



Figura 1.16 GAZ H₂-Van.

En Febrero de 2005 la empresa Quantum presentó su “Quantum H2-Prius”, con un motor turbocargado e Inter-enfriado, de 4 cilindros en línea, de 1.5 L, 75 hp @ 4 mil rpm, con un sistema de almacenamiento Quantum de H₂ comprimido a 35 MPa y 1.6 Kg. de H₂ y un sistema de almacenamiento de hidruros metálicos a 10 MPa y 4.0 Kg. de H₂, con un rango de 68 km/ Kg. de H₂ [22].



Figura 1.17 *Quantum H2-Prius.*

En marzo de 2005 en Genova la empresa Mitsubishi presento un auto conceptual llamado “Mitsubishi Nessie”, que tiene un motor V8 de 2.5 L a hidrógeno.



Figura 1.18 *Mitsubishi Nessie.*

En Octubre del 2005 en el Motor Show de Tokio, la compañía Mazda presento el “Premacy H2 RE hybrid” un auto conceptual híbrido con un motor rotario que funcionaba con gasolina e hidrógeno en conjunto con un motor eléctrico de 30 kW, con un rango de 200 km con hidrógeno [23].



Figura 1.19 *Premacy H2 RE hybrid.*

En Enero de 2006 en el Autoshow 2006 de los Ángeles, California, USA el Centro de Diseño en América de Hyunday Kia presentó un vehículo de carreras llamado “Kia SIDEWINDER”, que se encuentra en etapa de estudio de diseño y que utiliza una turbina a hidrógeno para impulsarse.



Figura 1.20 *Kia SIDEWINDER.*

En Enero de 2006 en el North América Internacional Auto Show la empresa Ford presentó un camioneta pickup denominada “F-250 Super Chief tri-fuel truck” que tiene la particularidad de utilizar tres tipos de combustible, gasolina, E85 (gasolina con 15 de etanol) e hidrógeno comprimido a 70 MPa, el motor que utiliza es un V10, 6.8 L turbo-cargado (sólo para el hidrógeno), que tiene una potencia de 310 hp (231 kW) con gasolina y E85, y una potencia de sólo 250 hp (187 kW) cuando funciona con hidrógeno, tiene un rango de distancia de 800 km con los tres combustibles. Se espera que este vehículo pueda ser comercializado en un precio cercano a los US \$50,000, en éste momento se encuentra en estudios de diseño [24].

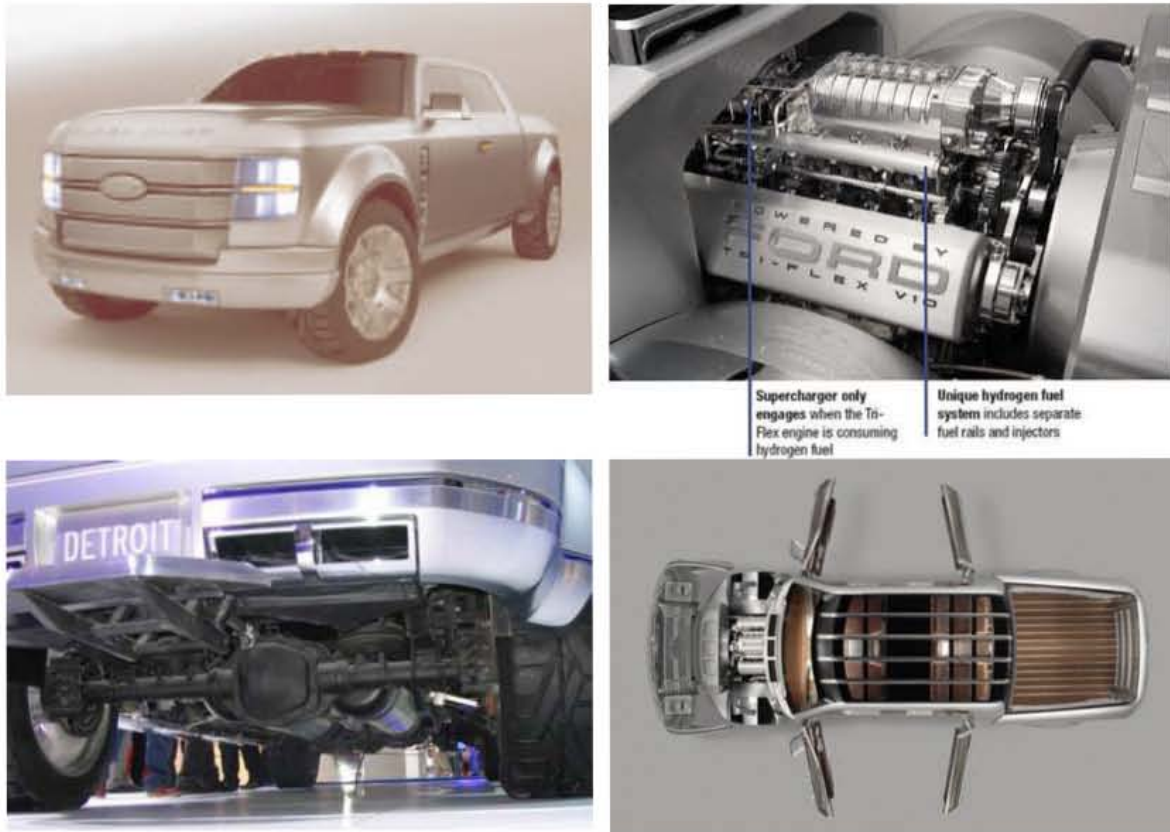


Figura 1.21 F-250 Super Chief tri-fuel truck.

En Febrero de 2006 en Hiroshima, Japón la corporación Mazda Motor recibió permiso del Ministerio de Infraestructura Terrestre y Transporte para empezar a arrendar el auto RX-8 a hidrógeno RE a sus dos primeros clientes corporativos, siendo así los primeros contratos de arrendamiento de vehículos equipados con motores rotatorios a hidrógeno y a gasolina en el mundo. El precio del arrendamiento mensual del Mazda RX-8 Hydrogen RE es de alrededor de US \$ 3,600, que es cerca de la mitad del precio del arrendamiento mensual de un vehículo con celda de combustible ya disponible en Japón, y el plazo es de 30 meses. El Mazda RX-8 Hydrogen RE cuenta con un motor rotatorio de 0.654 L x 2, 80 kW con H₂, 154 kW con gasolina, con un almacenamiento de 110 L de H₂ comprimido @ 35 MPa, con un rango de 100 km con H₂ [25].



Figura 1.22 Mazda RX-8 Hydrogen RE.

En marzo del 2006, en el 76 Motor Show Geneva en Suiza, se presentó un vehículo de concepto de la compañía Fiat denominado Versión ligera del Fiat Panda, con un motor bivalente capaz de funcionar con gasolina e hidrógeno, el hidrógeno se almacenó en forma de gas comprimido.



Figura 1.23 Versión ligera del Fiat Panda.

En marzo del 2006 en el marco de la NHA annual Hydrogen Conference 2006, se presentó una camioneta pickup GMC Truck Silverado con un motor de combustión interna de hidrógeno V8, 6.0 L, que almacena 10.5 Kg. de hidrógeno comprimido en tres tanques a 35 MPa, se espera que tenga una economía de combustible de 15.7 litros de gasolina equivalente por cada 100 km y un rango de recarga de hidrógeno de 250 km. Se probarán 8 vehículos durante 2 años dentro del proyecto de Utilización de Hidrógeno Residual Industrial en Columbia Británica, Canadá. La empresa que impulsa este proyecto es Power Tech Laboratories.



Figura 1.24 *GMC Truck Silverado a hidrógeno.*

REFERENCIAS

- [1].- IPCC 2001 Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001. Climate Change 2001: The scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report: Cambridge University Press.
- [2].- Lovelock, J.E. 1988. The Ages of Gaia. New York: W.W.Norton and Co.
- [3].- Schlesinger, W.H. 1997. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. New York: National Academic Press.
- [4].- Silver, C.S. y R.S. DeFries. 1990. One Earth, One Future. Washington, D.C.: National Academic Press.
- [5].- Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero asociadas al consumo de energía 1998.
- [6].- IV Informe de Labores CFE 2003-2004.
- [7].- Informe de Labores 2001. CFE.
- [8].- Cambio Climático: una visión desde México. Julia Martínez y Adrian Fernández Bremauntz (compiladores). SEMARNAT, INE. Noviembre 2004.
- [9].- Cuadro C2 Evolución de los precios de los combustibles. Anexo C Costos Futuros de la Energía. Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2004-2013. CFE.
- [10].-Table 8c. US Regional Natural Gas Prices: Base Case. Energy Information Administration. Official Energy Statistics from de US Government.
- [11].-Antonio Gershenson. Energéticos: los tiempos y los engaños. Sección Política, La Jornada Domingo 22 de enero de 2006.
- [12].-Noé Cruz Serrano, et al. Finanzas página 1, El Universal, Jueves 09 de marzo de 2006.
- [13].-Robert h. Perry, Don W. Green, James O. Maloney. Manual del Ingeniero Químico. McGraw Hill,1992.
- [14].-Hydrogen Vehicles by Musashi Institute of Technology "MUSASHI" series 1974-1997 <http://www.herc.musashi-tech.ac.jp>
- [15].-Folkecenter for Renewable Energy: <http://www.folkecenter.dk/>
- [16].-Ovonic Hydrogen Systems LLC:<http://www.ovonic-hydrogen.com/>
- [17].-BMW Clean Energy:
<http://www.bmw.com/generic/com/en/fascination/technology/cleanenergy/>
- [18].-Ovonic: <http://www.ovonic-hydrogen.com/>
- [19].-<http://www.newscom.com/cgi-bin/prnh/20040920/NYM197>
- [20].-<http://www.h2-developpement.fr>
- [21].-<http://www.hydrogen.ru/print.php?sid=91%20>
- [22].-Quantum: www.qttw.com/products/oem/hybrid/h2hybrid.php
- [23].-Mazda: <http://www.mazda.com/publicity/release/200510/1005be.html>
- [24].-F-250 Super Chief tri-fuel truck.
- [25].-Japan's Corporate News Network.
- [26].-Rose JW, Cooper JR. Technical Data on Fuels. Edinburgh, UK: Scottish Academic Press, 1977.

CAPITULO II

TIPOS DE MOTORES Y SU OPERACIÓN

Introducción

El motor de combustión interna que impulsa los automóviles modernos ha cambiado muy poco desde su diseño original de hace más de 90 años. Sin embargo muchos de los avances de alta tecnología, diseño del motor aún dependen del entendimiento básico de la termodinámica y la mecánica de fluidos. El propósito de este capítulo es realizar una revisión de las características fundamentales de los actuales motores que operan bajo un ciclo determinado y que permite su caracterización mediante parámetros termodinámicos que permiten entender el desempeño de éstos.

Por ejemplo:

- a) Motor a gasolina y cuyo comportamiento lo describe el ciclo Otto.
- b) Motor a Diesel y cuyo comportamiento lo describe el ciclo Diesel.
- c) El sistema Turbocompresor cuyo comportamiento lo describe el ciclo Brayton.

2.1 Parámetros importantes

Antes de abordar los ciclos termodinámicos se debe establecer algunos parámetros de modo que se entienda el significado de los ciclos.

2.1.1 Procesos

Cualquier cambio que experimente un sistema de un estado de equilibrio a otro, se llama *proceso*, y la serie de estados por la cual pasa un sistema durante un proceso recibe el nombre de trayectoria del proceso. Para describir por completo un proceso, deben especificarse sus estados inicial y final, así como la trayectoria que sigue y las interacciones con los alrededores.

Cuando un proceso ocurre de tal manera que el sistema permanece infinitesimalmente cercano a un estado de equilibrio en todo momento, se le llama *proceso cuasi estático*, o de *cuasi equilibrio*. Un proceso de cuasi equilibrio se considera un proceso lo suficientemente lento, como para permitir al sistema realizar un ajuste interno de manera que las propiedades en una parte del sistema no cambien más rápido que en otras.

Debe señalarse que un proceso de cuasi equilibrio es un caso idealizado y no una representación verídica de un proceso real. Pero varios procesos reales tienden a él y pueden modelarse como de cuasi equilibrio con un error insignificante. Los procesos de cuasi equilibrio son fáciles de analizar; los dispositivos que producen trabajo entregan la mayor cantidad del mismo cuando funcionan en procesos de cuasi equilibrio. Por lo tanto, los procesos de cuasi equilibrio sirven como modelos para comparar procesos reales.

Los diagramas de proceso que se grafican a partir de propiedades termodinámicas como coordenadas son muy útiles en la visualización del proceso. Algunas propiedades comunes que se

utilizan como coordenadas son la temperatura T , la presión P y el volumen V (o volumen específico v). La figura 2.1 muestra el diagrama P - V de un proceso de compresión de un gas.

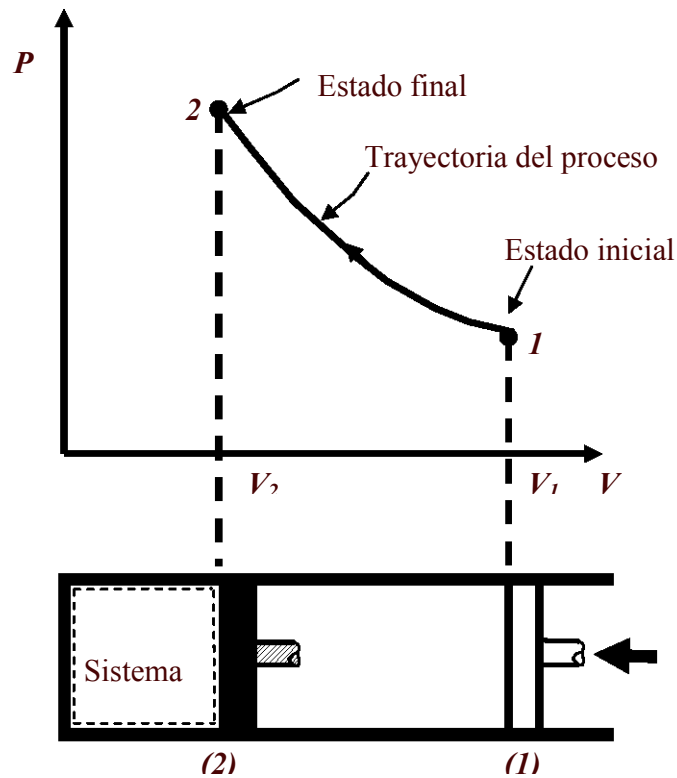


Figura 2.1 *Proceso de compresión de un gas*

La trayectoria de un proceso indica una serie de estados de equilibrio, por los que pasa el sistema durante un proceso y tiene importancia sólo para los procesos de cuasiequilibrio.

El prefijo *iso* se emplea con frecuencia para designar un proceso en el que permanece constante una propiedad particular. En un proceso *isotérmico*, por ejemplo, la temperatura T permanece constante, en un *proceso isobárico* la presión P permanece constante, y un *proceso isocórico* (o *isométrico*) es un proceso durante el cual el volumen específico v permanece constante.

Se dice que un sistema se somete a un *ciclo* si al término de un proceso regresa a su estado inicial. En un ciclo los estados inicial y final son idénticos.

2.1.2 Máquinas térmicas

El trabajo es convertible en calor directa y completamente, pero convertir el calor a trabajo requiere el uso de algunos dispositivos especiales. Estos dispositivos se llaman *máquinas térmicas*. Las máquinas térmicas difieren considerablemente unas de otras, aunque todas se caracterizan por lo siguiente [1]:

- a) Reciben calor de una fuente de alta temperatura (energía solar, hornos de petróleo, reactores nucleares, etc.).
- b) Convierten parte de este calor en trabajo (normalmente en la forma de un eje de rotación).
- c) Liberan el calor de desecho remanente en un sumidero de baja temperatura (la atmósfera, ríos, etc.).
- d) Funcionan en un ciclo.

Las máquinas térmicas y otros dispositivos cíclicos suelen incluir un fluido al y desde el que el calor se transfiere mientras se somete a un ciclo. Este fluido recibe el nombre de *fluido de trabajo*.

El término *máquina térmica* muchas veces tiene un sentido más amplio para incluir dispositivos que producen trabajo y que no operan en un ciclo termodinámico. Máquinas que involucran combustión interna como las turbinas de gas y los motores entran en esta categoría. Tales dispositivos operan en un ciclo mecánico pero no en un ciclo termodinámico, ya que el fluido de trabajo (los gases de combustión) no se someten a un ciclo completo. En lugar de que se enfríen hasta la temperatura inicial, los gases de escape se evacuan y sustituyen por una mezcla fresca de aire-combustible al final del ciclo.

2.1.3 Diagramas P/V y T/S

Para representar los ciclos termodinámicos se utilizan principalmente dos tipos de diagramas, PV (presión vs. volumen) y TS (temperatura vs. entropía).

En general, el diagrama PV resulta especialmente útil en el tratamiento de ciclos referentes a motores volumétricos, es decir, que confinan una masa de fluido en un volumen y realizan todo el ciclo sin una variación sensible de la masa del fluido.

En cambio, el diagrama TS se usa habitualmente en el tratamiento de ciclos referentes a máquinas de flujo, en que no existe discontinuidad en todo el fluido de trabajo.

Un ciclo térmico se representa en el diagrama P/V mediante una línea cerrada, como se puede ver en la figura 2.2. Si el fluido sigue el sentido de las agujas del reloj, el fluido realizará trabajo. Si por el contrario el fluido sigue el ciclo en sentido contrario, éste absorberá trabajo. En el diagrama P/V el área cerrada representa el trabajo cedido o absorbido. En el diagrama T/S , el área cerrada representa la cantidad de calor intercambiado por el fluido, esta área es igual al trabajo neto realizado, que es la diferencia entre el trabajo hecho durante la expansión y el trabajo absorbido en la compresión.

Trabajo Neto = Trabajo de expansión – Trabajo de compresión

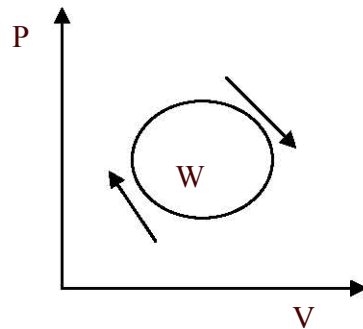


Figura 2.2 Ciclo termodinámico representado en un diagrama P/V

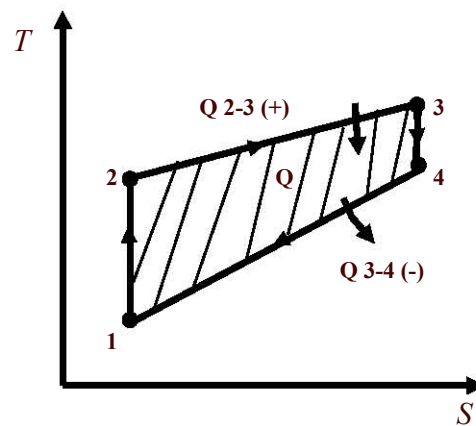


Figura 2.3 Diagrama T/S de un ciclo termodinámico

Como se puede ver en la figura 2.3, el área que queda por debajo del tramo 4-1 representaría la cantidad de calor expulsado por el fluido, mientras que la que queda por debajo de la línea del tramo 2-3 representaría la cantidad de calor absorbida por el fluido. La diferencia de estas áreas es igual al área más oscura del interior del ciclo y, representa la cantidad de calor intercambiada por el fluido.

Si se llama Q_1 al calor introducido y Q_2 al calor extraído, como se transforma en trabajo sólo parte del calor Q_1 proporcionado por la fuente, $Q_1 - Q_2$, el rendimiento térmico teórico de un ciclo cualquiera es:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

2.1.4 Presión media teórica

Durante el ciclo termodinámico en un motor volumétrico alternativo de cilindrada V_d , la presión en el cilindro varía en cada instante; si se considerase esta continua variación de la presión para evaluar la potencia del motor, se debería realizar cálculos muy complejos. El cálculo se simplifica notablemente si se toma el valor medio de todas las presiones del ciclo. Teniendo de referencia un

diagrama genérico en coordenadas P/V , como el dibujado en la figura 2.4, el área del ciclo, representa el trabajo útil hecho por el fluido.

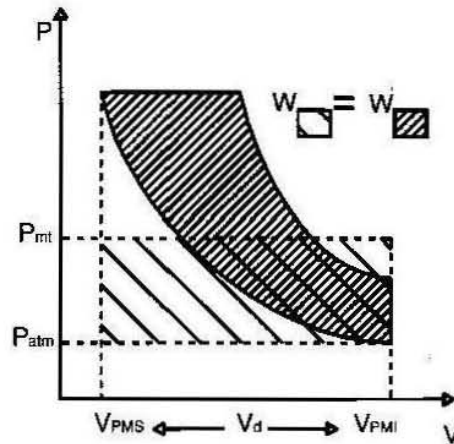


Figura 2.4 *Presión media teórica*

El área del rectángulo definido representa también el trabajo útil del fluido, y su altura será la presión media del ciclo que se haya considerado. Si se multiplica el valor de la presión media en bar o kg/cm^2 por la cilindrada en cm^3 , se obtiene el mismo valor que el trabajo útil representado por el área del ciclo teórico. En la figura 2.5 está representado el diagrama P/V de un ciclo con todos los posibles procesos teóricos adiabáticos, a presión constante y a volumen constante. Esta figura será de gran utilidad para encontrar una expresión generalizada de la presión media, que permitirá su cálculo rápido y que se aplicará a los ciclos con procesos de este tipo. También se han definido unos parámetros útiles para la caracterización de los ciclos.

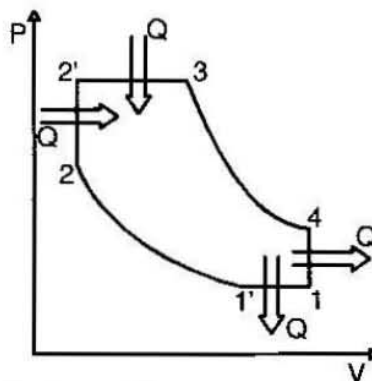


Figura 2.5 *Diagrama P/V con todos los posibles procesos adiabáticos, a presión constante y a volumen constante*

- a) 1'-2 Compresión adiabática.
- b) 2-2' Aportación de calor a volumen constante
- c) 2'-3 Aportación de calor a presión constante.
- d) 3-4 Expansión adiabática.
- e) 4-1 Evacuación de calor a volumen constante.
- f) 1-1' Evacuación de calor a presión constante.

Para caracterizar las aportaciones y extracciones de calor, se utilizan los siguientes términos:

- a) Grado de aportación de calor a presión constante (grado de combustión): $\beta_e = \frac{V_3}{V_2}$
- b) Grado de aportación de calor a volumen constante (grado de explosión): $\alpha_e = \frac{P_2'}{P_2}$
- c) Grado de sustracción de calor a presión constante (grado de contracción): $\beta_s = \frac{V_1}{V_1'}$
- d) Relación volumétrica de compresión: $\rho = \frac{V_1}{V_2}$

El trabajo teórico que gráficamente viene representado por el área que cierra el ciclo del diagrama P/V vendrá dado por:

$$Wt = W_{2'3} + W_{34} - W_{1'1} - W_{21'} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Así pues:

$$Wt = V_2 P_1 \frac{\rho^k ((\alpha_e - 1) + k \alpha_e (\beta_e - 1))}{(k - 1) \beta_s^k} \eta \quad \text{Ec. (2.3)}$$

La presión media teórica valdrá:

$$pmt = \frac{Wt}{V_1 - V_2} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

$$pmt = P_1 \frac{\rho^k ((\alpha_e - 1) + k \alpha_e (\beta_e - 1))}{(\rho - 1)(k - 1) \beta_s^k} \eta \quad \text{Ec. (2.5)}$$

2.2 Ciclos ideales termodinámicos

Al estudiar las máquinas y motores térmicos, se utilizarán ciclos de referencia o ideales que permiten una simplificación de un proceso. Es decir, difícilmente se podrá optimizar un motor basándose en un ciclo ideal, pero sí permiten comprender las tendencias fundamentales para el diseño de los motores, etc. Los ciclos usados principalmente, ya sea sólo a nivel teórico, históricamente o actualmente, son los que se listan a continuación:

- | | | |
|-----------|-------------|-------------|
| a) Carnot | d) Diesel | g) Brayton |
| b) Lenoir | e) Sabathé | h) Ericsson |
| c) Otto | f) Atkinson | i) Stirling |

Sin embargo, sólo se estudiarán los ciclos ideales que representan el funcionamiento de las máquinas de combustión interna que acopladas a un generador generan electricidad, que son: el ciclo de Carnot, el ciclo ideal Otto, el ciclo ideal Diesel y el ciclo ideal Brayton.

2.2.1 El ciclo de Carnot

El ciclo más básico del que se puede hablar y tomado como referencia es el llamado *ciclo de Carnot*. Carnot demostró que el rendimiento de la transformación de calor en trabajo, transformación que se produce en un motor alternativo, se incrementa al aumentar la diferencia de temperaturas entre la fuente caliente y el sumidero frío.

Este ciclo presenta el rendimiento más elevado que se puede asociar a un ciclo termodinámico. Sin embargo, no existe ningún mecanismo que permita seguir todos los procesos que implica el ciclo y sea eficiente.

En la figura 2.6 esta dibujado el ciclo de Carnot, constituido por las siguientes fases:

- 3-4 *expansión isotérmica*
- 4-1 *expansión adiabática*
- 1-2 *compresión isotérmica*
- 2-3 *compresión adiabática*

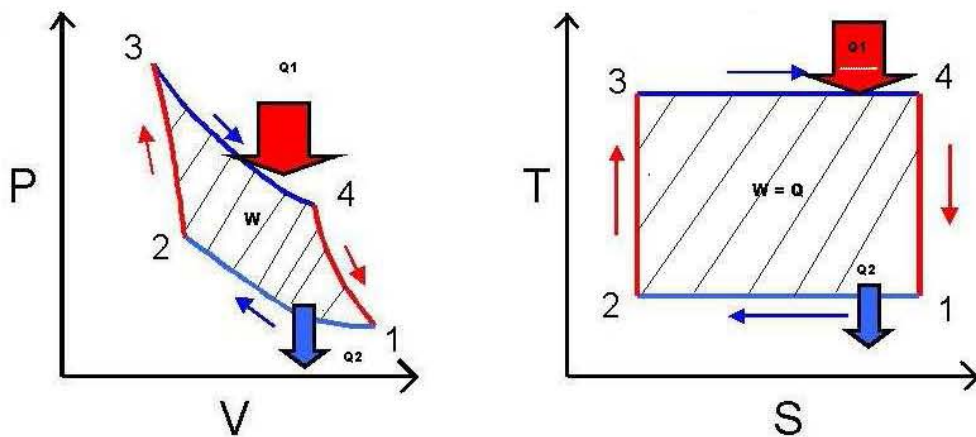


Figura 2.6 Ciclo de Carnot representado en los diagramas P/S y T/S

El área que se encuentra por debajo de los puntos 3 y 4 del diagrama T/S representa el calor aportado, Q_1 , mientras que Q_2 , el calor extraído, se identificaría con el área por debajo de los puntos 1 y 2. Mirando la figura 2.6 se comprueba que, para una Q_1 constante, si se disminuye la temperatura T_1 , se aumenta la temperatura T_3 . El hecho que se produzcan estas condiciones interesará, pues lo que se busca es un trabajo neto (W) lo más grande posible.

Se obtiene el rendimiento térmico del ciclo de *Carnot* a partir del diagrama T/S del ciclo, los calores aportado y extraído valdrán:

$$Q_1 = T_3(S_4 - S_3) \quad \text{Ec. (2.6)}$$

$$Q_2 = T_1(S_1 - S_2) \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Los procesos 2-3 y 4-1 son adiabáticos e isentrópicos, entonces: $S_4 = S_1$ y $S_2 = S_3$; a partir de aquí se deduce la expresión de trabajo neto:

$$W_{neto} = Q_1 - Q_2 = T_3(S_4 - S_3) - T_1(S_1 - S_2) \quad Ec. (2.8)$$

Por lo tanto:

$$\eta = \frac{T_3(S_4 - S_3) - T_1(S_1 - S_2)}{T_3(S_4 - S_3)} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad Ec. (2.9)$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad Ec. (2.10)$$

El *ciclo de Carnot* tiene el rendimiento máximo que se puede conseguir entre las dos temperaturas límite T_3 y T_1 de la fuente de calor y del refrigerante respectivamente.

2.2.2 El ciclo ideal Otto

Para el motor de ignición por chispa (bujía) la idealización es llamada el ciclo de Otto, después de que el Dr. N. A. Otto, en 1876, patentó un motor estacionario a gas usando aproximadamente este ciclo. Dicho ciclo ideal emplea un pistón en un cilindro. El pistón está conectado a una manivela por medio de una barra de conexión Figura 2.7. La manivela rota, y el pistón viaja hacia arriba y hacia abajo. Hay dos válvulas, una válvula de entrada y una válvula de escape, y un arreglo para abrirlas y cerrarlas.

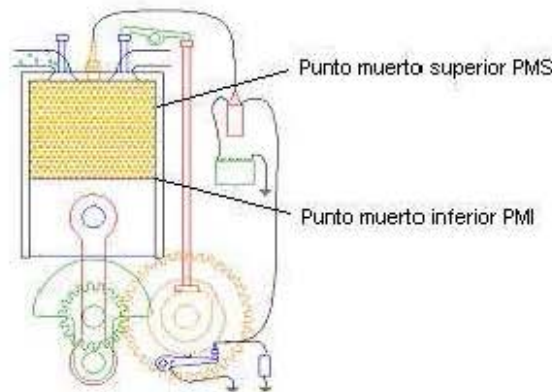


Figura 2.7 Motor de combustión por chispa (bujía)

El *ciclo Otto* es el ciclo ideal que se asocia al motor de encendido por chispa, aunque difiere netamente del ciclo real, pero sirve para explicar el proceso bajo hipótesis sencillas. Los procesos termodinámicos que se producen están representados en la figura 2.8 y son los siguientes:

- 1-2 *Compresión adiabática*: compresión del fluido de trabajo, el pistón tiene que realizar trabajo de compresión W_1 .
- 2-3 *Aportación de calor a volumen constante*: introducción instantánea de calor aportado Q_1 .
- 3-4 *Expansión adiabática*: expansión correspondiente al trabajo W_2 , realizado por el fluido de trabajo sobre el pistón.
- 4-1 *Extracción de calor a volumen constante*: extracción de calor instantánea de calor Q_2 .

En realidad, en los motores de 4 tiempos la extracción de calor se produce en la fase de escape, desde la apertura de la válvula de escape (4-1-0), y además el fluido se introduce en el motor en la carrera de admisión (0-1). Este hecho queda representado gráficamente en el diagrama P/V de la figura 2.8 por una línea horizontal discontinua. Estos dos procesos (1-0 y 0-1) se anulan teóricamente entre ellos, dando una pérdida o ganancia de calor nulos. Así, en el diagrama P/V del *ciclo Otto Ideal* sólo se considerará el ciclo cerrado.

La aportación de calor dentro del motor, Q_1 , se realiza a volumen constante, y por tanto el trabajo en esta fase es nulo $W_{2-3} = 0$. De acuerdo con la ecuación de conservación de la energía se tiene:

$$\Delta U = W + Q \quad \text{Ec. (2.11)}$$

$$U_3 - U_2 = Q \quad \text{Ec. (2.12)}$$

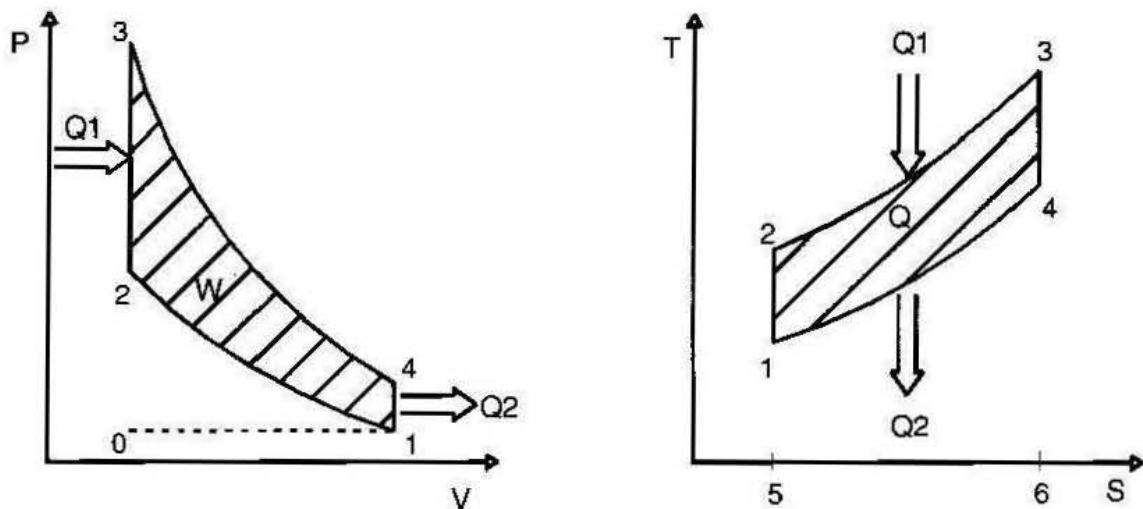


Figura 2.8 Ciclo de Otto en coordenadas P/V y T/S

Donde $Q_1 = \text{área } 2-3-6-5-2$ y $Q_2 = \text{área } 4-1-5-6-4$

Como se estudia un ciclo ideal y este se caracteriza por utilizar un gas perfecto como fluido de trabajo, se cumplirá:

$$U_3 - U_2 = C_V (T_3 - T_2) \quad \text{Ec. (2.13)}$$

$$Q_1 = C_V (T_3 - T_2) \quad \text{Ec. (2.14)}$$

De la misma manera, como la extracción de calor Q_2 es a volumen constante:

$$Q_2 = C_V (T_4 - T_1) \quad \text{Ec. (2.15)}$$

El rendimiento térmico ideal vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\eta_\varepsilon = \frac{\text{calor aportado} - \text{calor extraído}}{\text{calor aportado}} \quad \text{Ec. (2.16)}$$

$$\eta_\varepsilon = \frac{C_V (T_3 - T_2) - C_V (T_4 - T_1)}{C_V (T_3 - T_2)} = \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad \text{Ec. (2.17)}$$

Como los procesos de expansión y compresión son adiabáticos, se pueden utilizar las ecuaciones referentes a los procesos adiabáticos:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad \text{Ec. (2.18)}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1} \quad \text{Ec. (2.19)}$$

Además: $V_1 = V_4$ y $V_3 = V_2$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \quad \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

Sustituyendo en la Ecuación 2.17, se obtiene:

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1} = 1 - \frac{1}{\rho^{k-1}}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\rho^{k-1}} \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Donde ρ es la relación volumétrica de compresión:

$$\rho = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Ec. (2.21)}$$

El rendimiento térmico del *ciclo Otto* es función de la relación de compresión ρ y de la relación de calores específicos k [2] y por lo tanto no depende de la cantidad de calor aportado o el grado de explosión.

A partir de la expresión general de la presión media teórica y aplicando las condiciones del *ciclo Otto* se obtiene:

$$p_{mt} = P_1 \left[\frac{\rho^k - \rho}{(\rho - 1)(k - 1)} \right] (\alpha - 1) \quad \text{Ec. (2.22)}$$

De esta expresión se deduce que la presión media, y por consecuencia el trabajo por cilindrada, es función lineal de la presión inicial P_1 de la carga, del grado de explosión y de ρ y de k .

2.2.3 Eficiencias para el ciclo real Otto

El *ciclo Otto* es el ciclo ideal que se asocia al motor de encendido por chispa. Sin embargo el ciclo real de un motor de cuatro tiempos de encendido por chispa se caracteriza por:

- El tiempo de admisión: El pistón baja hacia el punto muerto inferior PMI y hace entrar la mezcla de aire y combustible preparada por el carburador o inyector en la cámara de combustión abriendo la válvula de admisión (Fase Abierta).
- El tiempo de compresión: Se cierra la válvula de admisión (Fase Cerrada) y el pistón comprime la mezcla inflamable moviéndose hacia el punto muerto superior PMS. Aumenta la temperatura.
- El tiempo de potencia: Mientras las válvulas de admisión y escape están cerradas (Fase Cerrada) una chispa de la bujía inicia la combustión del gas, la presión aumenta y empuja el pistón hacia abajo. Así el gas caliente realiza un trabajo.
- El tiempo de escape: Se abre la válvula de escape (Fase Abierta) y el pistón empuja los gases de combustión hacia el tubo de escape.

En el desarrollo de las etapas anteriores hay pérdidas que no permiten obtener la eficiencia ideal del ciclo de Otto mismas que se comentarán en las secciones siguientes.

2.2.4 Eficiencia del ciclo de aire

Puesto que la presión en el tiempo de potencia es mayor que en el tiempo de compresión (debido a la adición de calor en el PMS) hay un trabajo neto hecho por el cilindro durante el ciclo. El trabajo es igual al área dentro del diagrama de la figura 2.9 [3] Al mismo tiempo, no todo el calor que fue agregado en el PMS ha sido convertido en trabajo porque el aire en el cilindro en 4 de la figura 2.9 está aún más caliente que en 1. Cuando la válvula de escape es abierta en 4, se permite que este calor escape.

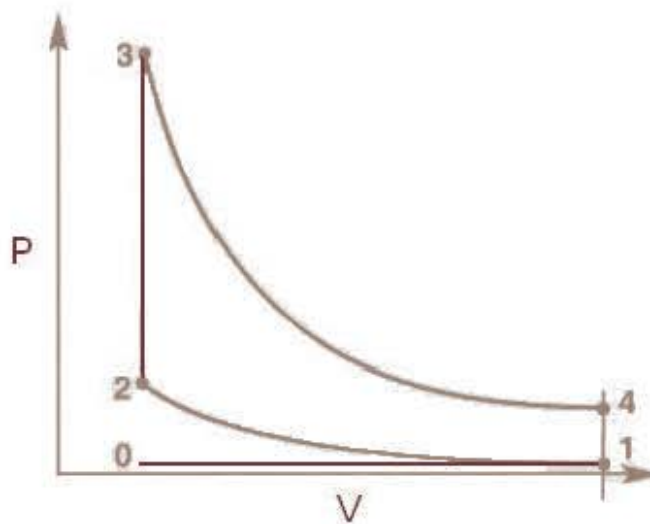


Figura 2.9 Ciclo Otto ideal

Se puede definir una eficiencia para éste proceso basado en la idealización del ciclo (conocido como el ciclo de aire, puesto que se asume que el fluido de trabajo es aire durante todo el ciclo). Esto es un cálculo relativamente directo [4]: una compresión isentrópica de (un proceso isentrópico es aquel durante el cual la entropía del fluido de trabajo permanece constante, un proceso en el que no se absorbe ni se pierde calor se llama adiabático) de **1** a **2**, y una expansión adiabática de **3** a **4**. La eficiencia está designada por η_{ac} , donde el subíndice se refiere al ciclo del aire, y es igual al trabajo producido, dividido entre el calor agregado. El resultado del cálculo es:

$$\eta_{ac} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{k-1} \quad \text{Ec. (2.29)}$$

Donde r es la relación de compresión, k es la relación de calores específicos, $k = c_p / c_v$, el calor específico a presión constante y a volumen constante. En un gas biatómico a temperatura normal $k = 1.4$. La eficiencia del ciclo del aire se ubica en el rango de 0.42 a una relación de compresión de 4 hasta 0.56 a una relación de compresión de 8.

2.2.5 Eficiencia de un gas real.

Muchas cosas están sucediendo en un motor real que no están incluidas en la eficiencia del ciclo del aire η_{ac} . En primer lugar, el gas no es sólo aire. En el tiempo de admisión y compresión el aire está mezclado con combustible, y en el tiempo de potencia y escape el gas es una mezcla de C, CO, CO₂, H, OH, H₂, H₂O, N, NO, NO₂, N₂, y O₂. Esto hace una diferencia substancial; por ejemplo una mezcla estequiométrica de gasolina tiene una relación de calores específicos $c_p/c_v = 1.35$ [4] y no 1.4. Además, se pierde calor y la combustión no es instantánea.

Se puede calcular la eficiencia tomando en cuenta los gases reales, pero ignorando el hecho de que se pierde calor y la combustión no es instantánea. Esto es, que el calor es liberado por la combustión de la mezcla a volumen constante. Las paredes del cilindro se consideran adiabáticas. Esta eficiencia toma en cuenta algunas de la complejidades de una situación real, pero no todas ellas. Desafortunadamente, esto es un cálculo mucho más complicado y no resulta en una fórmula simple. Entre otras cosas, la composición de equilibrio de la mezcla de gases durante el tiempo de potencia y de escape es una función de la temperatura y esta constantemente cambiando. Esta eficiencia es llamada la eficiencia termodinámica de un gas real, y es designada por η_o (es subíndice *o* es por Otto). La relación de η_o entre η_{ac} es sólo una función débil de la relación de compresión; es primero una función de Φ (la relación de aire-combustible estequiométrica). Se puede considerar a $\Phi = 1$.

$$\frac{\eta_o}{\eta_{ac}} = 0.69 \quad \text{Ec. (2.30)}$$

2.2.6 Eficiencia indicada.

Finalmente, tenemos los efectos de la pérdida de calor, el hecho de que la combustión no ocurre instantáneamente, las válvulas cierran gradualmente, etcétera. La eficiencia que incluye todos estos efectos es llamada η_i , donde el subíndice se refiere a *indicada* de un diagrama, el cuál es producido por un dispositivo grabador instalado en el cilindro que registra la presión y el volumen actual dentro del cilindro. De modo que indicado significa actual, real pero medida en el cilindro. Esto es que no considera la energía necesaria: para bombear los gases dentro y fuera del cilindro, para activar algunos accesorios (bomba de aceite, ventilador y generador), para mover el árbol de levas (para operar las válvulas), etcétera. Determinar η_i es extremadamente complejo y debe de obtenerse de datos experimentales. Sin embargo, como en el caso de η_o , su relación con otras eficiencias no varía mucho, es primero una función de Φ y débilmente de la forma de la cámara de combustión, la cual influye en las pérdidas de calor a través de la relación volumen: superficie. Si se toman datos de un motor CFR (Coordinación de Investigación de Combustible), el cuál tiene una relación de compresión variable, una cámara de combustión cilíndrica y las válvula en la cabeza, se obtiene que $\Phi = 1.13$ [4]

$$\frac{\eta_i}{\eta_o} = 0.86 \quad \text{Ec. (2.31)}$$

Esto significa que en la relación en la que estamos interesados es aproximadamente:

$$\frac{\eta_i}{\eta_o} = 0.69 \times 0.86 = 0.59 \quad \text{Ec. (2.32)}$$

2.2.7 El ciclo ideal Diesel

Este ciclo ideal asignado a los motores de encendido por compresión para explicar de forma simple y teórica los procesos. La diferencia fundamental entre el *ciclo Diesel* y el *ciclo Otto* está en la fase de aportación de calor. En el *ciclo Otto* el calor es introducido a volumen constante, y en el *ciclo Diesel* se realiza a presión constante. Otra diferencia entre los dos ciclos se encuentra en la relación de compresión; para los motores Diesel está entorno de 14 a 24, mientras que para los motores de encendido por chispa varía entre 6 y 10. Los dos tipos de motores requieren de máxima relación de compresión para mejorar el rendimiento. Sin embargo, condicionados por el combustible, los motores de encendido provocado no deben sobrepasar una cierta relación de compresión para no sufrir efectos como el picado, mientras que los motores Diesel requieren de una relación de compresión mínima para garantizar el encendido por compresión y a partir de una determinada relación de compresión, el aumento de rendimiento ya no compensa el aumento de costos y peso del motor capaz de resistir las presiones que se generarían.

Como se puede ver en la figura 2.10, el ciclo Diesel está formado por 4 líneas térmicas:

- 1-2 *Compresión adiabática*
- 2-3 *Aportación de calor a presión constante*
- 3-4 *Expansión adiabática*
- 4-1 *Extracción de calor a volumen constante*

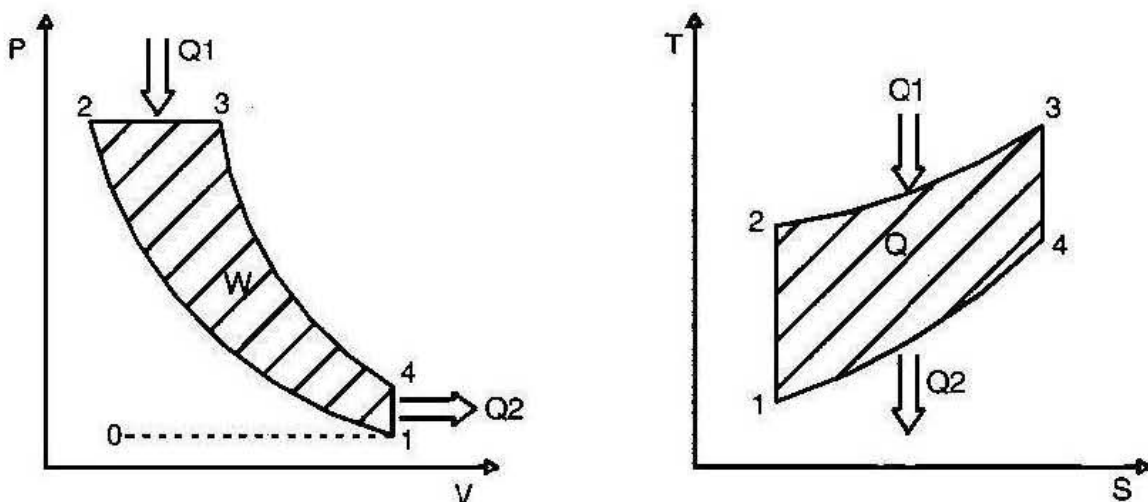


Figura 2.10 *Ciclo Diesel en coordenadas P/V y T/S*

En el proceso de aportación de calor, a presión constante, el pistón se desplaza, y por tanto realiza un trabajo y el rendimiento térmico ideal con que lo realiza se expresa:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\rho^{k-1}} \left[\frac{\beta_e^k - 1}{k(\beta_e - 1)} \right] \quad \text{Ec. (2.23)}$$

Donde $\beta_e = \frac{V_3}{V_2}$ es el grado de combustión. Se puede observar que, a diferencia del *ciclo de Otto*, el rendimiento no sólo es función de ρ y de k , sino que además lo es de β_e , y por tanto, depende del calor aportado por unidad de masa Q_1 . Analizando la última ecuación se comprueba que si aumenta β_e , el rendimiento se hace más pequeño, mientras que si aumenta la relación de compresión el rendimiento crece.

La única diferencia entre el rendimiento del ciclo Otto y el Diesel es el término entre paréntesis, que siempre es más grande que 1. Se llega a la conclusión de que, para igual relación de compresión, es más grande el rendimiento térmico del ciclo Otto que el del Diesel.

Si se reduce β_e , y por tanto, el calor aportado a presión constante, el rendimiento térmico del ciclo Diesel se aproxima al del ciclo Otto, hasta tal punto que cuando $\beta = 1$ los dos rendimientos coinciden. Si se aplican las condiciones del ciclo Diesel a la ecuación general de la presión media teórica (Ec. 2.5), se obtiene su expresión para este caso:

$$\alpha_e = 1 \quad \beta_s = 1$$

$$\frac{p_{mt}}{P_1} = \frac{\rho^k k (\beta - 1)}{(\rho - 1)(k - 1)} \quad \text{Ec. (2.24)}$$

2.2.8 El ciclo ideal Brayton

El *ciclo Brayton ideal* se puede considerar parecido a un ciclo Diesel con una sobre expansión hasta llegar a la presión inicial, de manera que la extracción de calor para volver al punto inicial se efectuará a presión constante.

El *ciclo de Brayton* describe la secuencia de procesos que realiza una turbina de gas y se utiliza para analizar su principio operativo. Figura 2.11

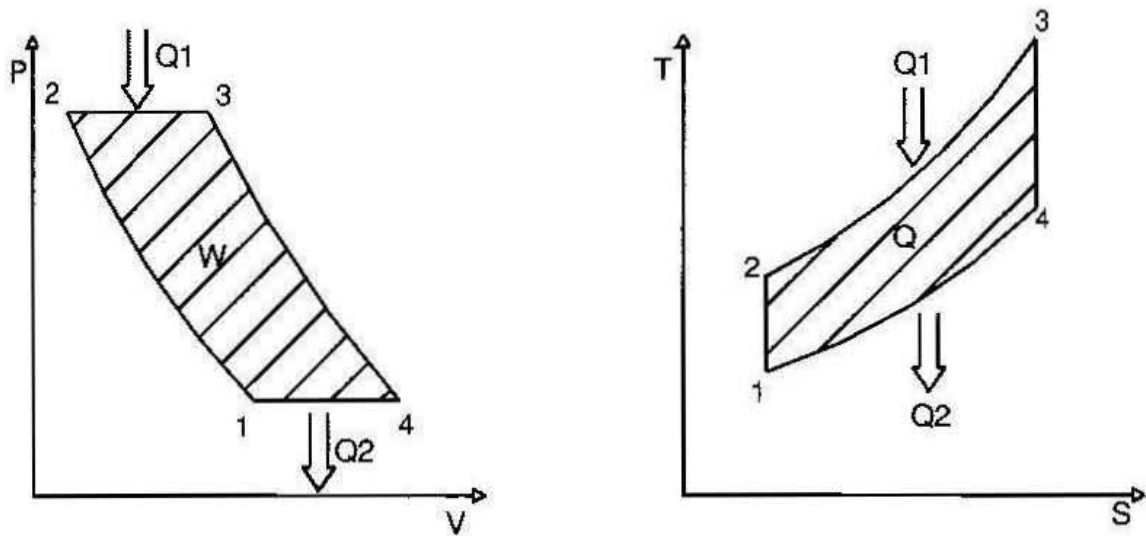


Figura 2.11 Diagrama P/V y T/S del ciclo Brayton

Las fases del ciclo son las siguientes:

- 1-2 *Compresión adiabática.*
- 2-3 *Aportación de calor a presión constante.*
- 3-4 *Expansión adiabática.*
- 4-1 *Extracción de calor a presión constante.*

Teniendo en cuenta toda la secuencia de proceso, se puede deducir su expresión del rendimiento: los procesos 4-1 y 2-3, como son a presión constante:

$$Q_{\text{aportado}} = Q_{23} = C_p(T_3 - T_2) \quad \text{Ec. (2.25)}$$

$$Q_{\text{extraído}} = Q_{41} = C_p(T_1 - T_4) \quad \text{Ec. (2.26)}$$

Entonces el rendimiento valdrá:

$$\eta = 1 - \left(\frac{\beta}{\rho} \right)^{k-1} \quad \text{Ec. (2.27)}$$

La presión media teórica del ciclo se determina a partir de la expresión general (Ec. 2.5) y teniendo en cuenta el tipo de procesos que se producen:

$$\alpha_e = 1$$

$$\frac{p_{mt}}{P_1} = \frac{\rho^k k (\beta - 1)}{(\rho - 1)(k - 1) \beta^k} \eta \quad \text{Ec. (2.28)}$$

2.3 Un ciclo más realista.

Se indicará en detalle de que forma la realidad difiere del ciclo ideal, los fenómenos que son responsables de que η_i difiera de η_o . En la figura 2.12 se ha esquematizado un ciclo real sobrepuesto en un ciclo ideal para mostrar las diferencias claramente. La curva nombrada *y-z* es una curva adiabática a través del punto *b*. Se han colocado los puntos donde ocurre la ignición (*a*), el término de la combustión (*b*), y la apertura de la válvula de escape (*c*). El área achurada a la izquierda de la curva *a-b* y bajo la curva *y-b* es llamada *pérdida por tiempo*, el área achurada arriba de la curva *b-c* es llamada *pérdida de calor* y el área punteada a la derecha de *c-1* es llamada *pérdida por expulsión de gases*. Y se discutirán enseguida.

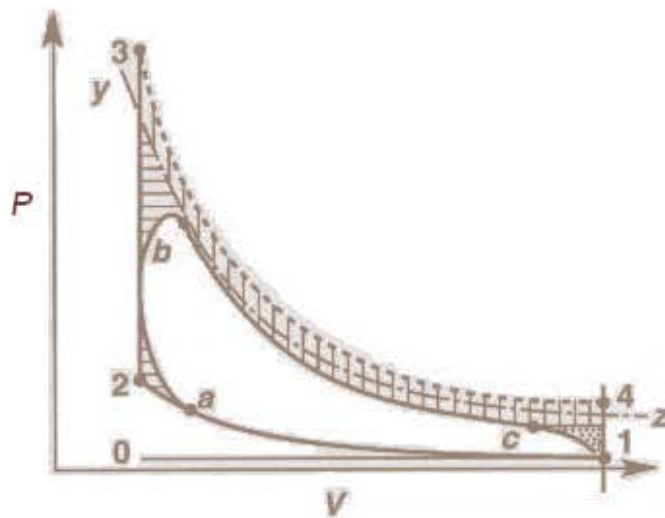


Figura 2.12 Diagrama P/V donde se ha sobrepuesto el ciclo Otto real sobre el Ideal

2.3.1. Pérdida por tiempo

La combustión no es una explosión; no ocurre de una sola vez. De hecho, es la quema ordenada de la mezcla de vapor de gasolina y aire. La bujía enciende la mezcla en la vecindad inmediata de la chispa de la bujía, y un frente de flama se propaga esféricamente alrededor de ahí. El frente de flama se propaga a una velocidad más o menos uniforme determinada en primera instancia por la velocidad de la flama del combustible empleado y por la velocidad de la turbulencia en el gas. Justo enfrente al frente de flama esta la mezcla aire combustible sin quemar, y detrás de él están los productos de la combustión. Al frente de flama le toma un cierto tiempo viajar desde el electrodo de la bujía hasta el punto más lejano de la cámara de combustión. Conforme el frente de flama viaja esta convirtiendo energía química en calor sensible, así que la temperatura y la presión del gas se incrementa continuamente. Es necesario iniciar la combustión (ignición) considerablemente antes del PMS, puesto que la combustión seguirá substancialmente pasado el PMS. La mayor eficiencia usualmente se obtiene cuando el punto de ignición y el punto en el cuál la combustión es completa son estrictamente simétricos con respecto al PMS. En cualquier caso la curva real usualmente *miente* bien dentro de la curva ideal (excepto para un tiempo muy retardado), como se muestra en la figura 2.12, y la diferencia entre el área representa trabajo que no pudo ser extraído. Esto se conoce como Pérdida por tiempo, lo que significa que es una pérdida debida al tiempo finito que le toma al frente

de flama cruzar la cámara de combustión. De la diferencia entre η_i y η_o , alrededor del 30 % se debe a pérdida por tiempo [4].

2.3.2 Pérdida de calor

Conforme la carga de admisión es comprimida en el tiempo de compresión su temperatura se incrementa, y por consecuencia se pierde calor por la paredes del cilindro. Esto no es demasiado serio, porque su temperatura no es muy alta; la reducción de la temperatura y la presión al punto de ignición es despreciable. Después de la combustión, sin embargo, la temperatura es considerable, y como se expande en el tiempo de potencia, su temperatura disminuye, hay una pérdida considerable de calor por las paredes del cilindro y de la cámara de combustión, resultando en una reducción substancial en su temperatura y presión al final del tiempo (se ha observado que esta pérdida es ya considerable en el tiempo de combustión). La diferencia entre este y el ciclo ideal representa trabajo que no puede ser extraído. La combinación de la pérdida de calor en el tiempo de compresión, en el tiempo de combustión y en el tiempo de potencia se conoce como Pérdida de calor. De la diferencia entre η_i y η_o , alrededor del 60 % se debe a pérdida de calor [4]. La forma usual de separar la pérdida por tiempo de la pérdida de calor se muestra en la figura 2.12, donde el área achurada horizontalmente está dada por la perdida por tiempo y el área achurada verticalmente por la perdida de calor.

2.3.3 Pérdida de potencia por expulsión de gases

Conforme el pistón se aproxima al PMI en el tiempo de potencia la válvula de escape es abierta. Por ejemplo, en un motor a gasolina la válvula de escape se abre a 47° antes del PMI. Inmediatamente la presión empieza a descender en la medida que los gases de escape salen del cilindro. Esta diferencia en presión entre el ciclo real y el ideal se traduce en trabajo no disponible, esto es llamado Pérdida Por Expulsión De Gases. De la diferencia entre η_i y η_o , alrededor del 10 % se debe a Pérdida Por Expulsión De Gases [4]

2.3.4 Otras pérdidas.

Las ilustraciones antes mencionadas son aproximadas, y hay otras pérdidas, usualmente casi despreciables cuando el motor trabaja a altas revoluciones por minuto (a toda potencia, inyección máxima de combustible) pero definitivamente no despreciables cuando el motor trabaja a bajas revoluciones por minuto. La operación del motor a altas revoluciones por minuto es una condición atípica; de hecho la mayor parte del tiempo trabaja a bajas y medias revoluciones por minuto (automotores). La presión cae por debajo de la presión atmosférica mientras el pistón desciende en el tiempo de admisión absorbiendo aire al cilindro en el trayecto, y la presión dentro del cilindro es mayor a la atmosférica en el ciclo de escape de los gases producto de la combustión, al trabajo realizado sobre los gases, y que no puede ser aprovechado, en el tiempo de admisión y escape se le llama *Pérdidas por bombeo*, las cuales representan entre un 2 y 2.4 % de las pérdidas del motor.

Hay otras dos pérdidas, ambas son pequeñas bajo circunstancias normales. La primera pérdida es porque no todo el combustible que es inyectado dentro del cilindro es quemado, por diversas razones

entre ellas: la mezcla de aire y gasolina no es uniforme y turbulenta, algunas regiones son ricas y otras pobres de combustible dentro del cilindro o de cilindro a cilindro y parte de la mezcla junto a las paredes del cilindro, en grietas de la bujía y de las válvulas, se enfría y no se quema. Por lo que, una pequeña fracción del combustible vertido dentro del cilindro no se quema y es arrojado con los gases de escape. Estos son los hidrocarburos no quemados que hacen la mayor contribución a la contaminación del aire, pero también disminuyen la eficiencia porque representan energía que no será convertida en trabajo. La *eficiencia de combustión* es definida como la relación de la energía liberada por la combustión entre la energía introducida al cilindro. Para mezclas que son estequiométricas o un poco pobres de combustible (o con exceso de aire), el promedio es de 0.98 para la mayoría de los motores (aunque ha sido observado tan bajo como 0.9). Conforme la mezcla se vuelve más rica, la cantidad de combustible que puede ser quemado está limitado por el aire disponible. Si todo el aire fuese usado la eficiencia de combustión sería $\eta_c = 1/\Phi$, donde Φ es la relación equivalente. Para $\Phi = 1.2$ y puesto que sólo el 93% del combustible disponible se quema [5] se tiene que $\eta_c = 1/1.12 \times 0.93 = 0.83$.

Finalmente, se tienen las *perdidas por fuga*. Los anillos del pistón y algunas veces las válvulas no sellan perfectamente y por consecuencia la presión del cilindro no es tan alta como debiera ser, representando una pequeña pérdida. Para un motor nuevo esta pérdida es casi despreciable, pero para un motor viejo es representativa y en virtud de que la fuga de presión toma un cierto tiempo, a altas revoluciones por minuto a los motores viejos les afecta menos esta fuga.

2.4 Golpeteo (Cascabeleo)

Mientras el frente de flama viaja a través de la cámara de combustión la temperatura y la presión de los gases se incrementa, debido a la continua liberación de calor. Sobre un valor mínimo de temperatura y presión, una mezcla de aire y vapor de combustible con una concentración particular a una presión y temperatura tiene un retraso de tiempo después del cual espontáneamente ignita, esto se conoce como auto ignición. Esto es, cuando la mezcla alcanza la temperatura y presión particular, una reacción empieza, el punto final de la cual es la ignición. Esta reacción no toma lugar toda de una sola vez. Este fenómeno es una función de la presión y la concentración. Si la mezcla no quemada enfrente de la flama que avanza en la cámara de combustión está a punto de alcanzar su auto ignición simultáneamente debido al aumento de la presión y la temperatura, entonces el resto de la mezcla no quemada se encenderá de una sola vez, y no esperará el arribo del frente de flama. La combustión que previamente había sido ordenadamente progresiva se volvería una explosión. De hecho, no todo ignita simultáneamente porque la composición y la temperatura no es del todo uniforme debido a la mezcla turbulenta; como una consecuencia, una o más regiones alcanzarán sus puntos de auto ignición un poco antes que otros y se encenderán antes. Por lo que, sin embargo, todo el gas restante está muy cerca del punto de auto ignición, otras regiones pronto alcanzarán sus puntos de auto ignición y todo el gas se encenderá, si no instantáneamente, entonces en un tiempo más corto que el tiempo en el cual el frente de flama normalmente cruza la cámara de combustión.

Si la explosión puede ser claramente escuchada, es llamada golpeteo, cascabeleo, balazo (sonido de bala). Al golpeteo se le puede llamar detonación, pero por ahora está reservado este término para situación de combustión en estado estable en la cual el frente de flama se propaga a velocidades supersónicas (cuando el frente de flama se propaga a velocidades subsónicas, es llamada

deflagración). El golpeteo es siempre debido al auto ignición, pero el auto ignición no siempre produce golpeteo.

Lo que se oye durante el golpeteo es la vibración estructural del bloque del motor, excitado por las fluctuaciones en la presión del cilindro. Los sensores de golpeteo, los cuales son usados para controlar el golpeteo (retardando el encendido de la bujía), operan censando esta vibración en la estructura del motor. El golpeteo severo puede ser muy dañino, particularmente para los pistones, causando daños en la parte superior del pistón, entre la ranura superior de la pared del pistón y el borde superior del pistón, y (después de largos periodos) la corona (circunferencia) del pistón se erosiona y eventualmente falla.

Es claro que se desea evitar el golpeteo. Para un combustible dado con propiedades anti golpeteo dadas (esto es, un valor dado del tiempo de retardo de la auto ignición a ciertas presión, temperatura y concentración en el cilindro), es esencial controlar cualquiera de los parámetros como la presión en el cilindro, o controlar la temperatura, o controlar el tiempo de encendido (de modo que el gas restante se queme antes de que se auto encienda). El tiempo de encendido puede ser controlado mediante el control (manejo) del nivel de turbulencia, la forma de la cámara de combustión y el número y localización de las bujías. Además, el gas restante puede ser enfriado forzándolo dentro de una región estrecha entre la corona del pistón y la cabeza del cilindro; enfriarlo retarda la reacción de auto ignición de modo que el gas restante es encendido antes de que auto encienda.

Para un motor existente, el avance en el tiempo de encendido de la bujía es el factor que tiene la mayor influencia sobre el golpeteo. Si el punto de encendido es demasiado antes del PMS, esto es, demasiado avanzado, entonces la combustión será completa antes del PMS y habrá un pico de presión, lo cual es la peor situación del golpeteo, porque se liberará la mayor presión y temperatura. Tanto como sea retardado el punto de ignición (esto es que el punto de ignición es movido más cerca del PMS) la combustión se completa después del PMS, puesto que el pistón ya ha empezado a bajar, el pico de presión y temperatura no es tan alta. Así como la chispa es más y más retrasada el pico de presión ocurre más y más después y se vuelve menos y menos. Hace algún tiempo, con un motor y un combustible dado, el distribuidor se ajustaba escuchando el resultado del avance para que fuera tan bueno como fuera posible sin producir golpeteo. Ahora las cosas son más complicadas, y hay muchas otras consideraciones que involucran al catalizador, a las emisiones, el calentamiento, y más. La computadora que controla el motor con sensores de golpeteo hace estos cálculos.

2.5 Presiones efectivas medias

Una *presión efectiva media* es la presión constante la cuál, actúa sobre el área del pistón a través del tiempo de potencia, que produciría el trabajo observado por ciclo. Esta presión es una útil ficción. Durante un ciclo real la presión es sólo significativa durante el tiempo de compresión y de potencia. Durante el tiempo de compresión se hace trabajo sobre el gas en el cilindro, mientras que durante el tiempo de potencia el gas en el cilindro hace trabajo sobre el pistón. Por lo tanto, la presión neta sería la diferencia entre estas dos. Se espera que la presión efectiva media sea la diferencia del promedio de las presiones en el tiempo de compresión y de potencia. Se define:

$$P = mepA_p Sn \frac{N}{X} = mepV_d \frac{N}{X} \quad \text{Ec. (2.33)}$$

Donde P es la potencia, mep (mean effective pressure) es la presión efectiva media, A_p es el área del pistón, S es el tiempo, n es el número de cilindros, N es la velocidad rotacional del cigüeñal (revoluciones por unidad de tiempo) y X es el número de revoluciones por tiempo de potencia. La cantidad de $X = 2$ para un motor de cuatro tiempos, y $X = 1$ para un motor de dos tiempos. V_d es el desplazamiento total del motor. Las presiones efectivas medias son medidas en varios sitios.

2.5.1 Presión efectiva media de freno

La más común de las presiones efectivas es la presión efectiva media de freno $b MEP$ (brake mean effective pressure). El adjetivo “de freno” se refiere a una medición en la volante, éste freno fue un dinamómetro primitivo. En la actualidad la potencia de freno significa una potencia que incluye los efectos de la ineficiencia mecánica, como la pérdida de potencia por bombeo, etcétera, y es usualmente designada como P_b o HP_b (brake horse power).

Una $b MEP$ típica en un motor operando a máxima potencia oscila entre 0.9 y 1.1 MPa. La $b MEP$ es útil porque se puede comparar incluso en motores muy diferentes, si estos motores diferentes queman el mismo combustible bajo aproximadamente las mismas condiciones, por lo tanto, generan presiones similares.

Las diferencias entre $b MEP$ representan diferencias de diseño genuinas y no diferencias irrelevantes como el tamaño. Así que, se puede comparar un motor minúsculo de un aeroplano a escala (aeromodelismo) con un desplazamiento de 1.6 cm^3 que funciona a 11,400 rpm, con un motor estacionario a diesel enorme con un desplazamiento de 0.4 m^3 que opera a 164 rpm. El primero tiene una presión efectiva media de freno de 0.32 MPa, mientras que el segundo tiene una $b MEP$ de 0.45 MPa.

2.5.2 Presión efectiva media indicada

Una presión efectiva media también puede ser definida en el cilindro, o más bien en la volante. Esta es llamada *Presión Efectiva Media Indicada*, o $imep$ (indicated mean effective pressure). La $imep$ claramente no contiene los efectos de la fricción mecánica, o el trabajo necesario para bombear los gases dentro y fuera y el manejo del cigüeñal y otros accesorios. Consecuentemente será algo mayor que $b MEP$, es designada por P_i o Potencia Indicada, y es la potencia que de no haber pérdidas por fricción se tendría disponible.

2.6 Comparación entre los motores de ignición por chispa y los de ignición por compresión

A partir de los análisis del proceso de combustión y de los sistemas auxiliares de ambos tipos de motores se puede establecer los aspectos comparativos que ofrece la tabla 2.1.

Tabla 2.1 *Caracterización comparativa de los motores de encendido por chispa y los de encendido por compresión.*

Motores de Encendido por Chispa	Motores de Encendido por Compresión.
Aportación de combustible en el exterior de la cámara de combustión durante la Fase Abierta del motor.	Aportación de combustible en el interior de la cámara de combustión durante la Fase Cerrada del motor.
Renovación de la carga con mezcla de aire-combustible.	Renovación de la carga con aire, que permite con idoneidad la sobrealimentación.
Al final de la compresión y antes de la combustión, se tiene una mezcla globalmente homogénea de aire y combustible.	Al final de la compresión y antes de la combustión se tiene una mezcla heterogénea de aire y combustible alrededor del orificio de inyección.
Dosificado global para que la mezcla esté dentro de los límites de inflamabilidad.	Dosificado global pobre $\Phi < 0.75$ no es necesario una condición global de mezcla porque esta no se produce.
Regulación de par motor por densidad de la carga mediante válvula de mariposa en el múltiple de admisión, generalmente.	Regulación de par motor directa por cantidad de combustible inyectado en el recinto de combustión.
Generación de contaminantes HC, CO y NOx que permite la utilización efectiva de un catalizador de tres vías.	Generación de NOx y partículas, no existe catalizador desarrollado efectivo para ambos.
Inicio de la combustión en el punto de ignición. Control preciso del momento y posición del inicio de la combustión.	Inicio indeterminado pasado el tiempo de retraso, no existe control preciso del momento y posición de inicio de la misma.
Regulación efectiva de la evolución de la combustión mediante el avance del encendido.	Regulación precaria de la evolución de la combustión mediante el avance de la inyección.
Combustión homogénea, frente de flama único y definido que recorre la mezcla homogénea de la cámara de combustión.	Combustión heterogénea, diversos frentes de flama producidos por autoencendido evolucionando sobre una mezcla heterogénea.
Combustión rápida que puede presentar problemas de detonación hacia el final del proceso.	Combustión inicialmente muy rápida en la etapa de premezcla y finalmente muy lenta en la fase de difusión.
Relación de compresión baja, limitada por la aparición de detonación.	Relación de compresión elevada para provocar el autoencendido del combustible y reducir el tiempo de retraso.
Combustión con gradientes de presión y liberación moderados si no existe detonación.	Combustión con gradientes de presión y liberación muy elevados que provocan ruido intenso.
Régimen de giro máximo elevado por la combustión rápida y la baja relación de compresión.	Régimen de giro máximo bajo por la combustión globalmente lenta y la elevada relación de compresión.
Rendimiento moderado, especialmente a cargas parciales.	Rendimiento elevado en todas las condiciones de carga.
Presión media efectiva moderada.	Presión media efectiva elevada.
Potencia específica elevada.	Potencia específica moderada.

En la actualidad la tendencia en el uso de una u otra tipología de motor depende esencialmente de dos aspectos: el interés económico o estratégico en función del tipo de combustible a emplear y el tamaño y peso en función de la aplicación.

2.7 Investigación de experimentos realizados

El hidrógeno H_2 tiene propiedades físicas únicas que requieren atención especial cuando se utiliza este como combustible en los motores de combustión interna.

Esta especial atención consiste en realizar una serie de modificaciones y adaptaciones que permite operar dichos motores con este combustible de manera adecuada. Es importante señalar que los actuales motores han sido diseñados en su gran mayoría para ser operados con combustibles fósiles como las gasolinas, por lo que dichas adaptaciones implican ciertos cambios que harán que estos motores operen de manera diferente. A continuación se muestran algunos resultados que se han realizado con el propósito de realizar dichas adaptaciones.

Las investigaciones que se han realizado sobre motores de combustión interna, alimentados con hidrógeno, se han enfocado a la conversión de un motor diseñado originalmente para funcionar con un combustible diferente al hidrógeno, entre las líneas de investigación que se han estudiado están:

- a) Conversión de un motor a gasolina para que funcione con hidrógeno.
- b) Conversión de un motor a gasolina para que funcione con mezcla de gasolina e hidrógeno.
- c) Conversión de un motor a diesel para que funcione con hidrógeno.
- d) Conversión de un motor a diesel para que funcione con mezcla de diesel e hidrógeno.
- e) Experimentos realizados con un motor de ignición por chispa para que funcione con mezclas de gas natural e hidrógeno.
- f) Experimentos de conversión de una turbina a gas natural para que funcione con hidrógeno o con mezclas de hidrógeno y gas natural.

Estas investigaciones se realizaron para determinar cual es el comportamiento de la máquina de combustión interna al ser impulsada con hidrógeno, observando una serie de parámetros, de los experimentos más destacados, entre los que se registraron:

- a) La salida de potencia
- b) La eficiencia del motor
- c) Las emisiones asociadas al cambio de combustible
- d) El rango de la relación de aire-combustible en el que opera bien el motor
- e) El tratamiento de los gases de escape

2.7.1 Experimentos de conversión de un motor a gasolina para que funcione con hidrógeno

En esta sección se mostrará aquellas investigaciones que convirtieron un motor a gasolina para que funcionara sólo con hidrógeno, se incluyen motores normalmente aspirados, así como, turbo cargados. Y se comentan algunos de los aspectos del motor más sobresaliente.

Tabla 2.2 Resumen de motores a gasolina convertidos a hidrógeno.

Ref.	Tipo de Motor	Potencia Original	Potencia con Hidrógeno	$\eta_{t \max}$	Emisión NO _x	Principal Aportación
[6]	Duratec HE-4 ^t 2.3 L, r = 12.2:1	112.65 kW	-7%	37 %	3-4 ppm ~90 ppm	Poca pérdida de Potencia
[7]	Triton 5.4 L V8 r = 9:1	194 kW	- 43 %	34 %	1.4 ppm 3900 ppm	Debe turbo-cargarse
[7]	Triton 5.4 L V8 r = 12:1	194 kW	- 62%	32.8%	2.1 ppm	Debe turbo-cargarse
[6]	Z-Tech 2.0 L r = 14.5:1	97 kW	-50%	39%	5.1 g/b-kWh	Debe turbo-cargarse
[8]	492Q de 4 cilindros	52.5 kW	-	-	-	Debe cambiarse la forma de la cámara de combustión.
[9]	Chevette 4 cilindros	900 kPa	-55% kPa	32%	< 100 ppm	Utilizar componentes nuevos en el bloque del motor
[10]	V8	170 kW @3,000 rpm	-56%	-	6-55 ppm	La alta cantidad de NO _x se debió a un exceso de H ₂ por el Sistema CVI

(t) turbo-cargado

r = relación de compresión

- No especificado en el artículo

La salida de potencia

La máxima salida de potencia de [6] fue de 13 bar (0.13 kPa) *b_{mep}*, se alcanzó con un $\Phi = 0.45$, a 4,000 rpm y cuando el turbo-cargador proporcionó una presión absoluta de 200 kPa en el múltiple de admisión.

Eficiencia Térmica

La eficiencia térmica indicada (ITE) y de frenado (BTE) del motor Duratec HE-4 de 2.3 L alcanzaron 50% y 37% [6], respectivamente. Es importante mencionar que la eficiencia térmica de frenado puede ser mejorada aumentándola de un 3 a 5% (dato de dinamómetro) si se reduce la pérdida por bombeo de gases con una estrategia utilizando la relación equivalente para controlar la carga en lugar de la de sofocar con la válvula de mariposa.

Emisiones

Las emisiones de NOx en un motor típico a gasolina funcionando en el punto de mapeo-amplio-mundial son entre 1200-1500 ppm.

Las emisiones de un motor de combustión interna deben ser inherentemente bajas cuando son operados en condiciones muy pobres (por ej. Usando exceso de aire para diluir la carga aire-combustible). Sin embargo, ésta estrategia también causa una considerable reducción en la salida de potencia.

Las emisiones del motor Duratec HE-4 de 2.3 L fueron extremadamente bajas a una relación equivalente de 0.5 y se incrementan precipitadamente cuando se incrementa la relación equivalente. Así, para 1,500 rpm / 2.62 bar *b_{mep}*, con el motor sofocado y $\Phi = 0.5$, las emisiones de NOx fueron de ~ 90 ppm. Con el motor no sofocado y $\Phi = 0.23$, las emisiones de NOx fueron de 3-4 ppm. Lo que significa que se redujo la emisión de NOx en el peor de los casos en un 92.5%, y en un 99.8% para el mejor de los casos en comparación con un motor a gasolina con características similares.

El rango de la relación de aire-combustible

Se encontró que la salida máxima de potencia se alcanzó cuando se mantuvo constante la relación aire-combustible $\Phi = 0.45$ [6].

El tratamiento de los gases de escape

Hay otra estrategia que tiene la capacidad de disminuir las emisiones de NOx, mientras que tiene un menor impacto en el esfuerzo de torsión. Ésta estrategia usa la recirculación de los gases de escape (EGR exhaust gas recirculation) en lugar del exceso de aire en la estrategia de mezcla pobre aire-combustible.

En el caso de estos motores [6] no se utilizó ningún tratamiento de los gases de escape.

2.7.2 Experimentos de conversión de un motor a gasolina para que funcione con mezcla de gasolina, o etanol e hidrógeno

En esta sección se mostrará aquellas investigaciones que convirtieron un motor a gasolina para que funcionara con mezclas de gasolina o metanol o etanol e hidrógeno se incluyen motores normalmente aspirados, así como, turbo cargados. Y se comentan algunos de los aspectos del motor más sobresaliente.

Tabla 2.3 Resumen de motores a gasolina adaptados para utilizar mezclas de hidrógeno.

Ref.	Tipo de Motor	Potencia H ₂	Mezcla y Potencia	$\eta_{t \max}$	Emisión	Principal Aportación
11	Motor CFR (Cooperative Fuel Research) 1 cilindro r = 9:1	- 26% & gasolina	CH ₃ OH → CO + H ₂	+ 22% & gas	CO 6 g/MJ	Es mejor utilizar el metanol líquido en vez de disociado
12	4.8 L r = 9.45:1	-	Etanol 85% Gasolina 15% H ₂ 8 - 12% vol	-	-	Arranque en temperaturas menores a 10°C
13	2.3 L r = 9:1	55 kW	60% - 70% de H ₂ vol.	+ 20%	-	Ahorro de energía en velocidad baja

r = relación de compresión

- No especificado en el artículo

La salida de potencia

En éste experimento se estudio el uso de metanol (CH₃OH) disociado como combustible en un motor de combustión interna, puesto que la adición de calor y presión ocasiona que el metanol se disocie en monóxido de carbono (CO) e H₂, pero se encontró que con está técnica sólo se obtiene el 74% de la potencia del motor en comparación con la gasolina, además, se concluyo que utilizar el metanol liquido para salidas de potencia baja da casi los mismos resultados que utilizarlo disociado sin el inconveniente del reactor de disociación [11].

El arranque en frío es un problema con combustibles alcohólicos E85 (Etanol 85% Gasolina 15%), el cual, es casi imposible de iniciar, a temperaturas menores a 10 ° C, sin tecnología adicional. Se cerró la válvula de recirculación de gases de escape EGR en arranque en frío. Se encontró que el porcentaje mínimo de H₂ en volumen para el arranque en frío de un motor que utiliza E85 es de 8%[12].

Eficiencia Térmica

Se reporta una mejora en la eficiencia térmica de hasta 22% superior a la obtenida con gasolina[11].

Emisiones

Las emisiones de CO se incrementaron significativamente en la medida en que se disminuía la relación equivalente de aire-combustible [11].

El rango de la relación de aire-combustible

La relación equivalente para la que se observó la mejor eficiencia fue de $\phi = 0.7$ [11].

El tratamiento de los gases de escape

En este ensayo no se trataron los gases de escape [11].

2.7.3 Experimentos de conversión de un motor a diesel para que funcione con hidrógeno

En esta sección se presentarán en forma resumida los trabajos que tuvieron como objetivo el convertir un motor diesel para que funcionará sólo con hidrógeno, como se ha comentado, el hidrógeno es muy difícil de encender sólo por compresión, así que se incluyen los experimentos que han logrado encender la mezcla de aire-hidrógeno. Y se comentan algunos de los aspectos del motor más sobresaliente.

Tabla 2.4 *Resumen de conversión de motores diesel a hidrógeno.*

Ref.	Tipo de Motor	Potencia Original	Potencia con Hidrógeno	$\eta_{t \max}$	Emisión NOx	Principal Aportación
14	1 cilindro 14 L r = 22:1	180 kW @ 900 rpm	-	-	-	La ignición del H ₂ por compresión no es aplicable aún
15	1 cilindro r = 33:1	- @ 1800 rpm	-	56%	560 ppm	Mayor eficiencia térmica indicada que en los motores de ignición por chispa
16	Recipiente de combustión a volumen constante	-	-	45%	30 ppm	Un motor a H ₂ de ignición por compresión requiere de una temperatura de 1,100 K en el PMS
17	1 cilindro inyección directa	700 kPa @1,200 rpm 800 kPa @1,800 rpm	+ 40% @1,200 rpm + 30% @1,800 rpm	53%	375-1,300 ppm	Emisión de NOx sensible al tiempo de inyección

r = relación de compresión

- No especificado en el artículo

La salida de potencia

En este experimento no se midió la potencia con hidrógeno pues el estudio se enfocó principalmente en descubrir a que relación de compresión si se inflama el hidrógeno, encontrándose que la $r = 22:1$ [14], muy alta pues el rango de la relación de compresión de un motor diesel oscila entre 12:1 y 23:1 [2], adicionalmente, se concluyó que los inyectores combinados que contienen 18 hoyos con diversos diámetros parecen ser la mejor geometría de la inyección de hidrógeno. Además, de que la ignición sólo por compresión del hidrógeno aún no es aplicable [14].

Eficiencia Térmica

Aunque no se reportó en [14] ni para diesel ni para hidrógeno a esa relación de compresión la eficiencia térmica del ciclo diesel debería de ser $\eta_{t \text{ diesel}} = 57\%$ [2].

En [15] se utilizó un motor de un cilindro libre de rápida ignición por compresión de la carga homogénea (HCCI homogeneous charge compression ignition) de aire-combustible que es un concepto aplicado relativamente nuevo en motores, y que supera la barrera de la ignición por compresión para el hidrógeno, y otros combustibles gaseosos, elevando a un nivel superior la relación de compresión del motor.

Emisiones

Aunque en [15] son altas se tienen estrategias como la de recirculación del 50% de los gases de escape, la utilización de convertidores catalíticos de una y tres vías para disminuirlas hasta que cumplan con normativas que exigen emisiones súper ultra bajas (SULEV super ultra low emission vehicle) de 0.13 ppm, que los autores estudiarán en un mediano plazo.

El rango de la relación de aire-combustible

La mejor relación equivalente se encontró que fue entre $\phi = 0.35 - 0.40$, que fue donde se encontró la mejor eficiencia [15].

El tratamiento de los gases de escape

Se estudiarán en un mediano plazo [15].

2.7.4 Experimentos de conversión de un motor a diesel para que funcione con mezcla de diesel e hidrógeno

En esta sección se comentará acerca de motores diesel que han sido modificados para operar con mezclas de diesel. Debido al alto índice de octano en el hidrógeno, que es de 130 (resistencia a la ignición por compresión, que para el caso de la gasolina es 87 y el diesel 30) se hace necesario que de no emplearse una bujía o muy altas relaciones de compresión, para encender la mezcla aire-hidrógeno, es necesario utilizar un rocío de diesel que prenda por compresión e inflame a su vez el resto de la mezcla aire-hidrógeno.

Cabe mencionar que también se ha estudiado la utilización del hidrógeno como un elemento que puede mejorar la combustión del diesel, y disminuir los contaminantes. Además, se ha investigado si mejora la combustión del biodiesel, éste y otros casos se resumen en la tabla 2.5 y se comentan algunos de los aspectos del motor más sobresaliente.

Tabla 2.5 *Resumen de motores diesel adaptados para utilizar mezclas de hidrógeno.*

Ref.	Tipo de Motor	Potencia Original	Potencia con Hidrógeno	$\eta_{t \max}$	Emisión NO _x	Principal Aportación
18	1 cilindro DID enfriado por agua $r = 15:1$	3.7 kW @1500 rpm	3.7 kW @1500 rpm	29.4%	894 ppm	7% de H ₂ en masa
19	1 cilindro 0.553 L $r = 16.5$	3.73 kW @ 1500 r.p.m.	- 2.5 %	36% ⁱ	-	20 % de H ₂ en caudal

r = relación de compresión

- No especificado en el artículo

ⁱ eficiencia térmica indicada

La salida de potencia

Permaneció inalterable a 100% de la carga cuando se añadió 7% de hidrógeno en masa junto con biodiesel y 5% de hidrógeno en masa junto con diesel, se concluyó en este experimento que sólo se debe utilizar el hidrógeno cuando el motor trabaja cerca de su máxima salida de potencia[18].

La eficiencia del motor

La eficiencia térmica del motor alimentado con biodiesel y 7% de hidrógeno en masa a 100% de la carga aumento un 7.3% al pasar de 27.3 a 29.3% y cuando se opero con diesel y 5% de hidrógeno en masa aumento un 5.6% al pasar de 30.3 a 32% [18].

Las emisiones asociadas al cambio de combustible

Cuando se alimento al motor con biodiesel y 7% de hidrógeno en masa hubo una reducción de las emisiones de hidrocarburos HC y de monóxido de carbono CO de 130 a 100 ppm y de 0.26 y 0.17% por volumen respectivamente a máxima salida de potencia. Con la inducción de hidrógeno, debido a las altas temperaturas, el nivel de NO_x se incremento de 735 a 875 ppm un 19% a máxima salida de potencia. Cuando se alimento al motor con diesel y 5% de hidrógeno en masa hubo una reducción de las emisiones de HC y de CO de 0.20 y 0.10% por volumen respectivamente a máxima salida de potencia; debido a las altas temperaturas, el nivel de NO_x se incremento de 785 a 894 ppm un 13.8% a máxima salida de potencia [18].

El rango de la relación de aire-combustible en el que opera bien el motor

Se alimentó al motor con biodiesel y 7% de hidrógeno en masa y con diesel y 5% de hidrógeno en masa a máxima salida de potencia en ambos casos. Además, se retrazo el tiempo de ignición 2 grados de cigüeñal para ambos casos [18].

El tratamiento de los gases de escape

No se utilizó ninguna estrategia adicional de tratamiento de los gases de escape [18].

2.7.5 Experimentos realizados con un motor de ignición por chispa para que funcione con mezclas de gas natural e hidrógeno

Cabe mencionar que un motor a gas natural en realidad es un motor que originalmente fue diseñado para trabajar con gasolina o con diesel, puesto que la diferencia entre los motores, es por un lado la forma en la que inician la combustión de la mezcla aire-combustible, y por el otro, el combustible que se adecua al sistema de ignición del motor.

En esta sección se mostrará aquellas investigaciones que utilizaron un motor de ignición por chispa con mezclas de gas natural GN e hidrógeno para que funcionara con mezclas de gas natural. Y se comentan algunos de los aspectos del motor más sobresaliente.

Tabla 2.6 Resumen de conversión de un motor de ignición por chispa para que funcione con mezclas de gas natural e hidrógeno

Ref.	Tipo de Motor	Potencia Original	Mezcla	$\eta_{t \max}$	Emisión	Principal Aportación
20	1 cilindro de relación de compresión variable.	-	80% GN y 20% H ₂ en volumen	-	-	Óptima mezcla de GN e H ₂
21	Ford V8 5.4 L	172 kW	85% GN y 15% H ₂ en volumen	-	-26% NO _x	Adecuada mezcla de GN e H ₂ y reducción de emisiones
21	Ford V8 5.4 L	172 kW	70% GN y 30% H ₂ en volumen	-	-25% NO _x	Menores emisiones & gasolina

r = relación de compresión

- No especificado en el artículo

La salida de potencia

El funcionamiento de un motor a GN de ignición por chispa puede ser mejorado considerablemente cuando cantidades relativamente pequeñas de H₂ (hasta 20 % en volumen) están presentes en el metano (CH₄). Esta mejora se observa principalmente cuando se opera el motor en relaciones equivalentes pobres de aire-combustible. La salida de potencia sufre un pequeño cambio cuando se agrega H₂ al CH₄. Sin embargo, más allá del 20% de H₂ en volumen disminuye la potencia, debido al bajo poder calorífico del H₂ en comparación con el mismo volumen de CH₄, para un rango de relaciones de compresión [20].

Eficiencia Térmica

Al operar un motor a GN de ignición por chispa en relaciones equivalentes pobres de aire-combustible se tienen un cierto número de aspectos positivos. En principio, se tiene una eficiencia térmica alta [20].

Emisiones

Además de una eficiencia térmica alta, se tienen emisiones reducidas especialmente de NO_x, y permite utilizar relación de compresión alta[20].

El tratamiento de los gases de escape

No se aplicó ningún tratamiento a los gases de escape [20].

2.7.6 Experimentos de conversión de una turbina a gas natural para que funcione con hidrógeno o con mezclas de hidrógeno.

En realidad, los experimentos que se han realizado se han centrado en estudiar el dispositivo donde se inicia la combustión en una turbina de gas, es decir, en el quemador. Identificando las características que debe reunir para que pueda quemar hidrógeno y sus mezclas con gas natural.

Un quemador: es un aparato destinado a facilitar la combustión de los carburantes líquidos o gaseosos en el hogar de las calderas o de otras instalaciones térmicas. Un quemador es un componente o un área pequeña de la turbina de gas donde ocurre la combustión. En un motor de turbina de gas, *el quemador* principal o la cámara de combustión está situado entre el compresor de alta presión y la turbina de alta presión del generador del gas.

Hay dos categorías de quemadores, anular y de lata. Los quemadores de lata se montan alrededor del motor. Pueden ser quitados fácilmente para el mantenimiento y proporcionar la plomería conveniente para el combustible. Los quemadores anulares son más compactos y encajados profundamente dentro de la cubierta de motor.

Como parte del estudio del diseño de quemadores de hidrógeno, se han registrado las emisiones contaminantes de estos, las temperaturas de los gases de escape y otros parámetros que se resumen en la tabla 2.7 y que muestran su comportamiento al quemar hidrógeno y sus mezclas con gas natural.

Tabla 2.7 Resumen de conversión de una turbina a gas natural para que funcione con hidrógeno o con mezclas de hidrógeno.

Ref.	Tipo de Quemador	Potencia Original	Mezcla	ϕ	Emisión	Principal Aportación
22	Radial de 9 hoyos de 6.73 mm de diámetro	-	70 -100% H ₂ y 0-30% GN en masa	0.12-0.4	-	Se amplió el límite pobre de la estabilidad de la flama con H ₂
23	Multi-lata de flujo-reverso para GN sin modificaciones 8.6 MW	15-24 MW	0 -100% H ₂ y 100-0% GN en masa	0.89 GN 0.808 H ₂	NOx 88 – 300 ppm	No hay limitación tecnológica para el uso de mezclas ricas en H ₂

La salida de potencia

El quemador que se estudio es similar al de la mayoría de las turbinas de gas de servicio pesado de la marca General Electric, cuya potencia oscila entre 15 y 24 MW, pero para éste estudio se utilizó su potencia en 8.6 MW [23].

Emisiones

Al incrementarse el porcentaje de hidrógeno, se disminuyó el porcentaje de carbono en la flama, lo que contribuyó a una reducción de las emisiones de CO y un incremento de las emisiones de NOx. Cuando se utilizó 100% de H₂, las emisiones de NOx fueron 3.4 veces mayores que usando sólo gas natural. Esto se debió al aumento de la temperatura de la flama, que paso de 2308 K en la zona más cálida del quemador con 100% de GN a 2354 K en la zona más cálida del quemador con 100% de H₂, y a la mala calidad del mezclado que arrojo relaciones equivalentes de $\phi = 0.89$ en la zona más cálida del quemador con 100% de GN y de $\phi = 0.808$ en la zona más cálida del quemador con 100% de H₂ [23].

El rango de la relación de aire-combustible

Se observó que cuando se utilizó 100% de H₂ se extendió el límite de estabilidad de la flama reduciendo así la relación equivalente de $\phi = 0.40$ a 0.12 [23].

Aportaciones

Se puede cambiar el combustible a mezclas ricas en hidrógeno sin problemas en la estabilidad de la flama y sin que se extinga. De hecho, la estabilidad de la flama con mezclas ricas en hidrógeno fue mejor usando gas natural [23].

Todos los valores medidos de la temperatura del metal del quemador para todas las mezclas de combustible están por debajo de los valores críticos para la carcasa y para la pieza de transición por lo que no hay limitación tecnológica para la utilización de las mezclas ricas de hidrógeno como combustible alternativo [23].

REFERENCIAS

- [1].- Máquinas Térmicas Motoras, Jesús Andrés Álvarez Flóres Ed. AlfaOmega ed 1ª. 2005.
- [2].- Termodinámica, Yunus A. Cengel. Ed Mc Graw Hill ed 4a. 2002
- [3].- John L. Lumley. Engines An Introduction. Ed. Cambridge University Press, ed 1ª 1999.
- [4].- C.F. Taylor, *The Internal Combustion Engine In Theory and Practice*, Volumen 1. M.I.T. Press, Cambridge, MA, 1966.
- [5].- J.B. Heywood. Internal Combustión Engine Fundamentals McGraw, 1988
- [6].- Hydrogen IC Engine Boosting Performance and NOx Study. Robert J. Natkin, Xiaoguo Tang et al. 2003 - 01-0631 University of California-Riverside
- [7].- The Effects of Change in Compression Ratio on Hydrogen Fueled Ford Modular V8", M. Swain, M. Swain, Report to Stuart Energy, January 2000.
- [8].- A hydrogen system with solenoid valves for a four-cylinder hydrogen-fuelled engine. L.S. Guo, H.B. Lu, et al. International Journal of Hydrogen Energy 24 (1999) 377-382.
- [9].- Lean Mixture Operation of Hydrogen- Fueled Spark Ignition Engines. James S. Wallace, et al. SAE Technical Paper Series 852119.
- [10].- Modifications to a Hydrogen / Electric Hybrid Bus Y. Baghzouz, J. Fiene, J. Van Dam et al. American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA-2000-2857 pp 363-370.
- [11].- Dissociated methanol engine testing results using H₂-CO mixtures. Eric Anthonissen, James S. Wallace. Reprinted from 18TH Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, August 21-26, 1983. No. 839091
- [12].- Ethanol vehicle cold start improvement when using a H₂ supplemented E85 Fuel. Gregory W. Davis, Edward T. Heil, Ray Rust. American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA-2000-2849 pp 303-308
- [13].- The Daimler-Benz Hydride Vehicle Project H. Buchner and R. Povel Int. J. Hydro-gen Energy Vol. 7, No.3, pp 259-266, 1982
- [14].- Peter Prechtl, Frank Dorer, et al. Energy conversion in a hydrogen fueled diesel engine: optimization of the mixture formation and combustion. Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers, 433-432, 1999
- [15].- Internal combustion engine report: spark ignited ICE genset optimization and A novel concept development. Jay Keller, Peter Van Blaringan. Proceedings of the 1998 U.S. DOE hydrogen program review. NREL/CP-570-25315
- [16].- Hydrogen combustion under Diesel engine conditions. J.D. Naber and D.I. Siebers IJHE 23 (1998) 363-371
- [17].- Performance Characteristics of Hydrogen-Fueled Diesel Engine with Ignition Assist. A.B. Welch, J.S. Wallace. SAE Technical Paper No. 902070, 1990
- [18].- Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine. M. Senthil Kumar, A. Ramesh, B. Nagalingam. International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) 1143 – 1154
- [19].- Use of Hydrogen in Dual Fuel Engines G. Gopal, P. Srinivasa Rao, K.V. Gopalakrishnan and B.S. Murthy Int. J. Hydrogen Energy Vol. 7, No.3, pp 267-272, 1982
- [20].- Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications. S.O. Bade Shrestha and G.A. Karim. The University of Calgary, Dept. of Mechanical Engineering Paper 97478 pp 910-915.
- [21].- Hydrogen/CNG Blended Fuels Performance Testing in a Ford F-150. Don Karner James Francfort. U.S. DOE FreedomCAR & Vehicle Technologies Program Advanced Vehicle Testing Activity INEEL/EXT-03-01313

- [22].-Reduced turbine emissions using hydrogen-enriched fuel. R.W. Schefer. Proceedings of the 2002 U.S. DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-610-32405
- [23].-Investigation of a gas turbine combustion system fired with mixtures of natural gas and hydrogen. H.J. Tomczak, G Benelli, et al. IFRF Combustion Journal Article No. 200207, 2002

CAPITULO III

RESULTADOS

(Acciones realizadas para convertir un motor de combustión interna a Hidrógeno)

Introducción

Se revisa en este capítulo las propiedades positivas, las limitaciones y las modificaciones necesarias actuales asociadas al uso de hidrógeno como un combustible en motores de ignición por chispa. Se muestra que el hidrógeno es un excelente prospecto para alcanzar un desempeño muy satisfactorio en aplicaciones de motores que pueden ser superiores en muchos aspectos a aquellos motores impulsados con combustibles convencionales. Un cierto número de cambios de diseño y operativos han de ser hechos para que el potencial del hidrógeno como combustible para motor sea alcanzado.

3.1 Algunas propiedades relevantes del hidrógeno

Algunas de las propiedades clave del hidrógeno que son relevantes para su empleo como combustible son mostradas en la Tabla 3.1[1].

Tabla 3.1 *Algunas Propiedades Comparativas Del Hidrógeno, Metano E Iso-Octano*

Propiedad	Hidrógeno	Metano	Gasolina	Diesel ^a
Densidad a 1 atm y 300 K (kg/m ³)	0.082	0.717	5.11	850 ^b
Composición Estequiométrica en el aire (% en volumen)	29.53	9.48	1.65	
Relación Estequiométrica combustible / aire en masa	0.029	0.058	0.0664	
No. De moles después de la combustión a antes	0.85	1.00	1.058	
Valores de Calor				
HHV High Heat Value(MJ/kg)	141.7	52.68	48.29	44.8
LHV Low Heat Value (MJ/kg)	119.7	46.72	44.79	42.5
HHV (MJ/m ³)	12.10	37.71	233.29	
LHV (MJ/ m ³)	10.22	33.95	216.38	
Energía de combustión por kg de mezcla estequiométrica (MJ)	3.37	2.56	2.79	
Viscosidad Cinemática a 300 K (mm ² /s)	110	17.2	1.18	1.9 ^c
Conductividad Térmica a 300 K (mW/m K)	182.0	34.0	11.2	
Coefficiente de difusión en el Aire a NTP (cm ² /s)	0.61	0.189	0.05	

a. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. College of the Desert. December 2001

b. Densidad Líquida

c. A 313 K. NOM-086-SEMARNAT-1994

Es evidente que el hidrógeno es un combustible gaseoso notablemente ligero que requiere en base volumen, la menor cantidad de aire para la combustión estequiométrica (2.39 & 59.6 para el iso-octano); mientras que en base masa requiere la más alta masa relativa de aire. Su combustión está también asociada con una contracción molar substancial de cerca del 15%. Su valor de calor en base masa es el mayor; pero en base volumen es el menor. También, puesto que el producto de su combustión en el aire sólo es agua, hay una diferencia significativa entre sus valores de calor mayor

y menor. Sin embargo, su liberación de energía por combustión por unidad de masa de una mezcla estequiométrica es una de las más altas.

El hidrógeno tiene algunos valores notablemente altos de propiedades claves para procesos de transporte, tal como su Viscosidad Cinemática, Conductividad Térmica y su Coeficiente de difusión en el Aire, en comparación de aquellos de los otros dos combustibles. Tales diferencias junto con su extremadamente baja densidad y baja luminosidad ayudan a darle al hidrógeno sus características únicas de transferencia de calor y difusivas.

La tabla 3.2 enlista algunas de las propiedades de combustión que tienen mucha influencia en el potencial comportamiento del hidrógeno como combustible en general y para aplicaciones en motor en particular. Los valores correspondientes para los otros combustibles representativos metano y gasolina comercial se muestran también para comparación.

Tabla 3.2 *Algunas propiedades de combustión comparativas del hidrógeno, metano y gasolina.*

Propiedad	Hidrógeno	Metano	Gasolina
Límites de Inflamabilidad (% en volumen)	4-75	5.3-15.0	1.2-6.0
Energía mínima de ignición (mJ)	0.02	0.28	0.25
Velocidad Laminar de Flama a NTP (m/s)	1.90	0.38	0.37-0.43
Temperatura de Flama Adiabática (K)	2318	2190	~2470
Temperatura de Auto ignición (K)	858	813	~500-750
Orificio de Apagado (mm) (quenching gap)	0.64	2.03	~2.0

Se ve notablemente que el hidrógeno tiene un rango amplio de mezclas inflamables en el aire que permite mezclas extremadamente pobres o ricas que soportan la combustión. Él requiere de una energía mínima considerablemente baja para efectuar la ignición con flamas resultantes extremadamente rápidas en comparación con aquellas mezclas de metano e incluso de iso-octano con aire. Sin embargo, el valor de su temperatura de ignición espontánea es muy similar a la de los otros dos combustibles y el valor de su temperatura máxima de combustión adiabática en el aire es sólo un poco más alta.

3.2 El hidrógeno impulsando aplicaciones en motores

El uso de hidrógeno como un combustible para motores se ha procurado en bases muy limitadas con grados variables de éxito por muchos investigadores por varias décadas [2], y la información acerca de sus descubrimientos está disponible en literatura abierta. Sin embargo, estos datos de desempeño reportados no necesariamente muestran un acuerdo consistente entre varios investigadores. También hay una tendencia a enfocarse en resultados obtenidos en motores específicos y sobre estrechas condiciones de operación modificadas. Por lo que se describirá de modo más amplio muchas de las modificaciones que se han hecho a diversos motores para que funcionen bien con hidrógeno. Antes es necesario introducir los elementos que en conjunto forman el sistema del motor de combustión interna de ignición por chispa y que realizan los tiempos de:

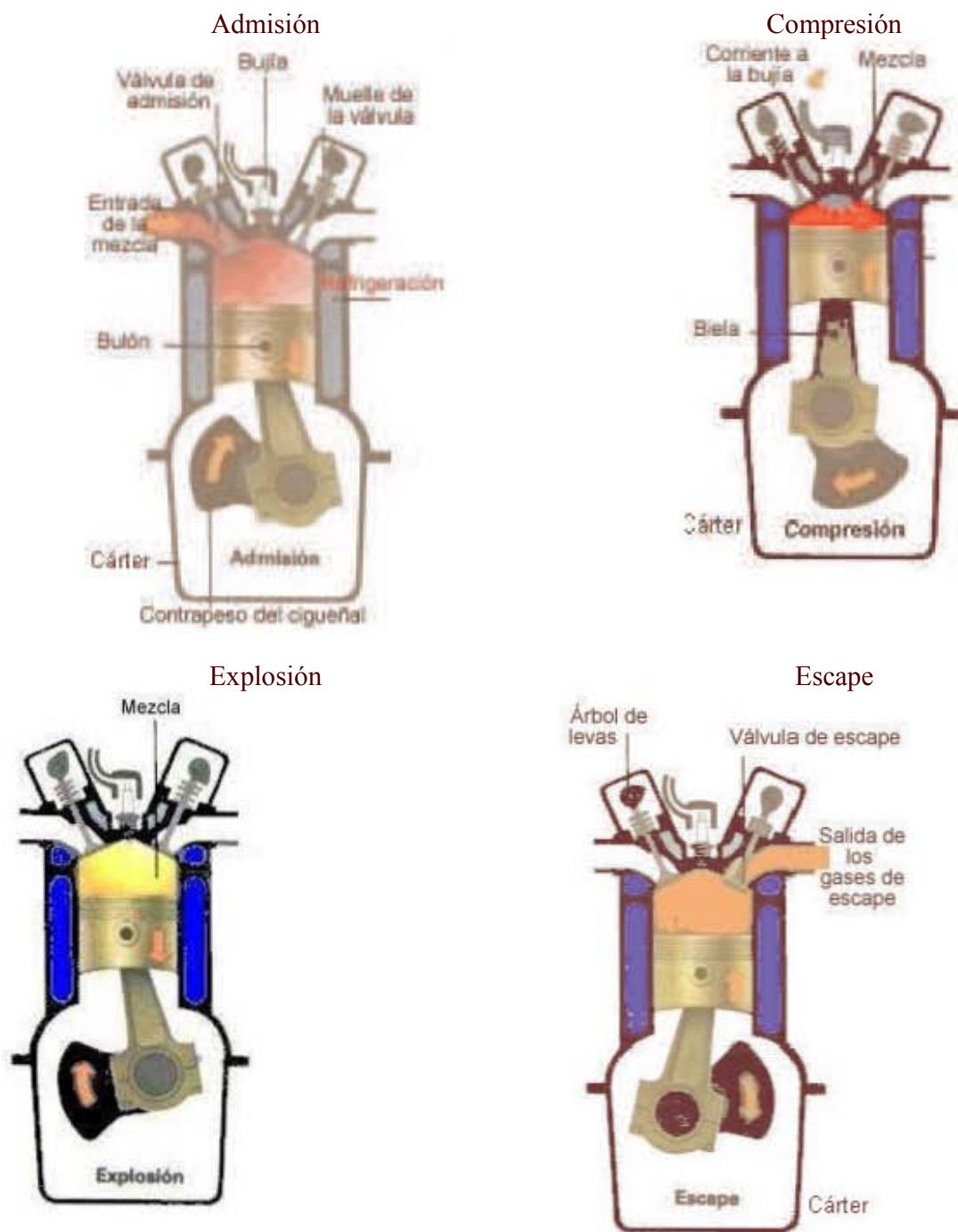


Figura 3.1 Los cuatro tiempos de un motor de ignición por chispa y algunos de sus elementos.

3.3 Elementos de un motor de combustión interna que deberán modificarse para que funcionen con hidrógeno como combustible.

3.3.1 Elementos del bloque del motor que deben ser modificados.

Entre las adaptaciones que se ha encontrado que son necesarias para que un motor de combustión interna de ignición por chispa funcione bien con hidrógeno se da una lista de los elementos dentro del bloque del motor que debe cambiarse o adaptarse y enseguida se comenta de modo más amplio el porque de estos cambios:

1. Los pistones, anillos, bulones, bielas.
2. Los asientos y los vástagos de las válvulas.
3. Rectificado de los cilindros.
4. Sistema de Ventilación Positiva del Cáster
5. Instalación de turbo-cargador e Inter-enfriadores aire-aire.

3.3.1.1 Características positivas del hidrógeno en aplicaciones en motores

Hay un número de características únicas asociadas con el hidrógeno que lo hacen notablemente bien adecuado en principio, para aplicaciones en motores. Algunas de las más notables son las siguientes:

- ✓ El hidrógeno, sobre un amplio rango de temperaturas y presiones tiene coeficientes de propagación de flama muy altas dentro del cilindro del motor en comparación con otros combustibles. Estos coeficientes permanecen suficientemente altos incluso para mezclas muy pobres que están lejos de la región de la mezcla estequiométrica. La liberación de energía asociada es también tan rápida como la duración de la combustión, que tiende a ser corta y contribuye para producir eficiencias de salida de potencia altas y coeficientes altos de incremento de presión posterior a la ignición por chispa[3]
- ✓ Las características del hidrógeno de quemado rápido permiten altas velocidades de operación del motor mucho más satisfactorias[8]. Esto permitiría un incremento en la salida del motor con una reducida penalidad para operación con mezclas pobres. También, la extremadamente baja temperatura de evaporación del hidrógeno trae consigo menores problemas de operación en climas fríos.
- ✓ Los motores a hidrógeno son más favorables para la operación a alta velocidad principalmente debido al coeficiente de quemado rápido.
- ✓ La operación de un motor a hidrógeno puede ser asociada a la menor pérdida de calor que con otros combustibles.
- ✓ La operación a moderadas relaciones de compresión es posible con mezclas pobres de hidrógeno en aire, lo cuál permite mayores eficiencias e incrementa la salida de potencia, como se muestra en la figura 3.2

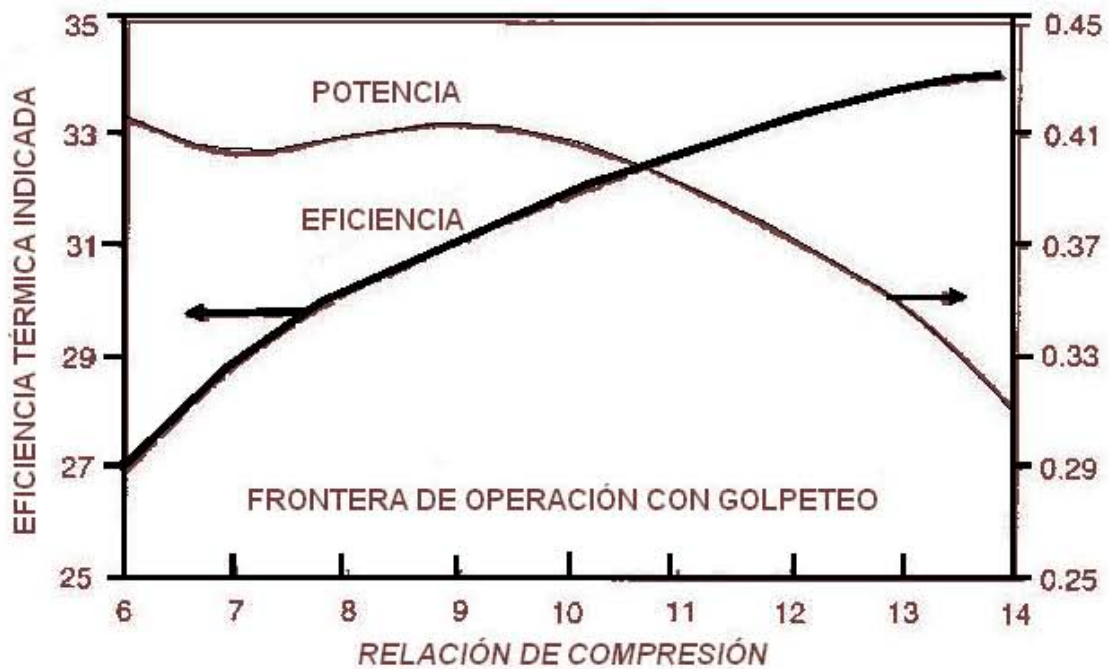


Figura 3.2 Variaciones típicas en la salida de potencia indicada y en la eficiencia con cambios en la relación de compresión cuando se usa el tiempo de encendido óptimo para la frontera sin golpeteo[5].

- ✓ Los motores a hidrógeno son muy adecuados para aplicaciones de cogeneración puesto que la transferencia de energía debida a la condensación del vapor de agua puede elevar significativamente la salida de la carga térmica y la correspondiente eficiencia térmica de la energía.
- ✓ El hidrógeno no como la mayoría de los otros combustibles es un combustible puro de propiedades y características bien conocidas, las cuales permiten la optimización mejor y continua del funcionamiento del motor.
- ✓ Las características termodinámica y de transferencia de calor del hidrógeno tienden a producir alta temperatura por compresión que contribuye a mejoras en la eficiencia del motor y a la operación con mezcla pobre.
- ✓ El coeficiente alto de quemado del hidrógeno hace que el funcionamiento de un motor alimentado con hidrógeno sea menos sensible a cambios en la forma de la cámara de combustión, al nivel de turbulencia y al efecto remolino en la carga de admisión de aire-combustible.
- ✓ El hidrógeno puede tolerar mejor la presencia de diluyentes. Esto puede permitir una mejor explosión de mezclas de combustible con valor bajo de calor LHV.
- ✓ El motor de ignición por chispa es absolutamente tolerante a combustible de baja pureza, no como la mayoría de las celdas de combustible.

3.3.1.2 Algunas limitaciones asociadas con la aplicación del hidrógeno en el bloque del motor

Mucha de la información reportada en la literatura abierta acerca del funcionamiento de motores con hidrógeno como combustible tienden a destacar las características positivas del hidrógeno mientras desestiman e incluso ignoran las muchas limitaciones asociadas con tal campo de aplicación. Hay una necesidad de enfocarse igualmente bien en estas y sugerir medios para sobrellevar algunos de sus aspectos negativos. Por consiguiente, se listan algunas características, asociadas con el hidrógeno como combustible de motores, que deben ser consideradas para realizar alguna acción de remedio:

- Los motores alimentados con hidrógeno sufren de reducida salida de potencia, debido principalmente al muy bajo valor de calor LHV del hidrógeno en base volumen y operación con mezcla pobre.
- Hay problemas potenciales serios asociados con la pre-ignición y las contra explosiones (backfiring) incontroladas dentro del múltiple de admisión de los motores a hidrógeno[10]
- Los motores a hidrógeno son propensos a producir presiones excesivamente altas dentro del cilindro y a iniciar el golpeteo, como se muestra en la figura 3.3 y 3.4. El número de octano equivalente del hidrógeno es más bajo en comparación con la gasolina y el metano comunes[11]

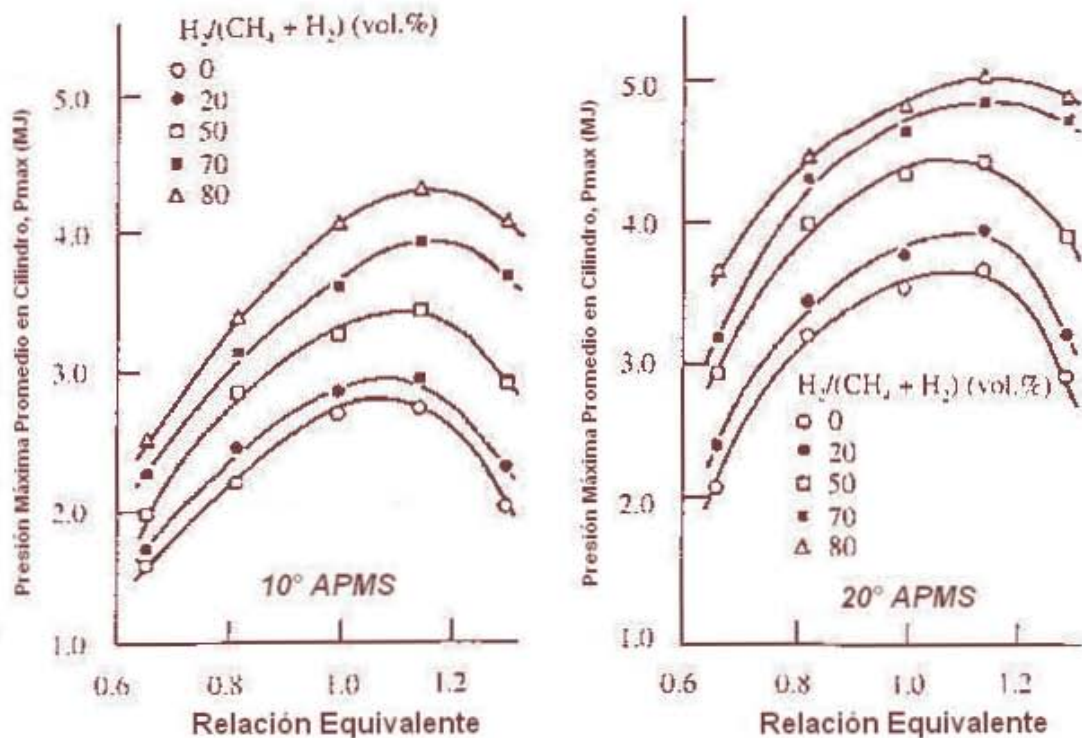


Figura 3.3 Variaciones típicas en la presión máxima en el cilindro con cambios en la relación equivalente cuando la operación sobre un rango de mezclas de combustible de hidrógeno y metano para dos diferentes grados de encendido antes del punto muerto superior (APMS)[9]

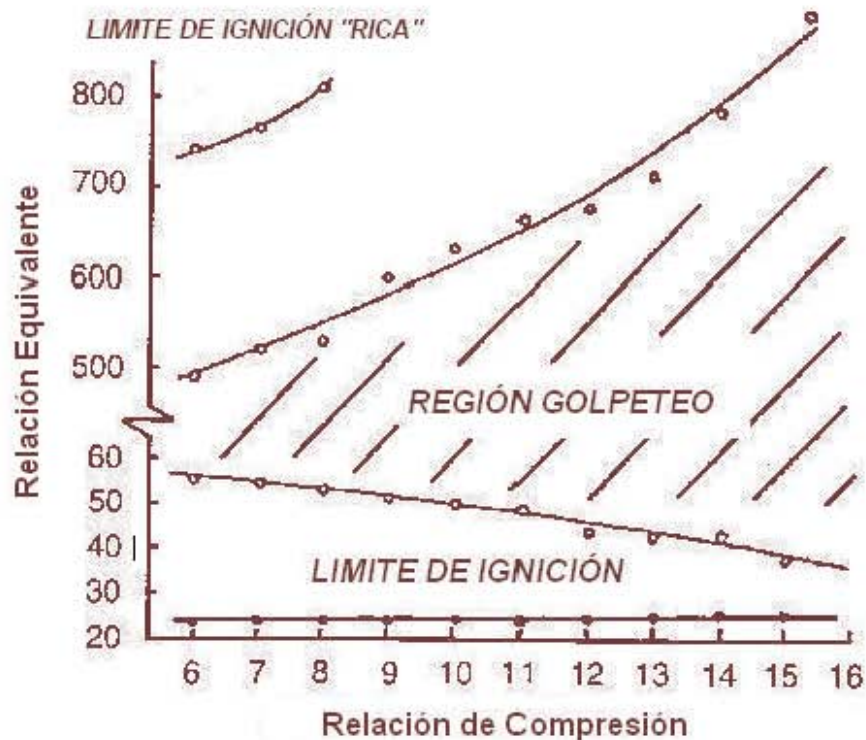


Figura 3.4 Variaciones de los límites de operación para la ignición y el golpeteo con cambios en la relación de compresión para la operación con hidrógeno a condiciones ambientales en la admisión[11].

- Los motores a hidrógeno pueden mostrar serias limitaciones para ser efectivamente turbocargados.
- La operación de un motor a hidrógeno conlleva adicionalmente ruido y vibraciones debidas a los incrementos rápidos de presión resultado de la rápida combustión.
- Hay un potencial mayor indeseable de corrosión y contaminación del aceite lubricante por la condensación del vapor de agua de los gases de escape.
- Hay un potencial mayor de los problemas de la duración operativa de los lubricantes.
- Las pérdidas por transferencia de calor pueden ser altas, incluso en condiciones donde deberían ser bajas.
- Un motor a hidrógeno necesita ser más grande, de un 40-60%, más que si funcionara con gasolina para la misma salida de potencia. Esto impone la reducción de la velocidad del motor, incrementando las pérdidas mecánicas del motor y le reduce su tolerancia al golpeteo. También se deben realizarle modificaciones al diseño del motor.

3.3.1.3 Algunas medidas para mejorar las características operativas del bloque de motores a hidrógeno de ignición por chispa.

Un número de posibles cambios de diseño y de características operativas de un motor de ignición por chispa alimentado con hidrógeno pueden ser sugeridas para alcanzar el potencial total del hidrógeno en su aplicación en el motor. Estas medidas pueden incluir lo siguiente:

- Se pueden usar motores con una velocidad rotacional mayor para incrementar la salida de potencia de un motor funcionando con hidrógeno mientras mantiene su eficiencia alta y está libre de golpeteo.
- Se pueden utilizar satisfactoriamente relaciones de compresión mayores para incrementar la salida de potencia y la eficiencia, principalmente por la relativamente rápida combustión característica de las mezclas muy pobres de hidrógeno-aire.
- Para producir una salida de potencia comparable con la obtenida con otros combustibles, son necesarios motores más grandes. Esto incrementará algo las pérdidas por fricción y del motor. Es necesario un mayor cuidado para reducir éstas pérdidas para que la operación con hidrógeno sea de alta eficiencia.
- Hay la necesidad de poner mayor atención a la transferencia de calor. Para la operación con mezclas pobres de hidrógeno son necesarias temperaturas más altas de la envoltura refrigerante del motor, que las normalmente empleadas para la operación con gasolina; sin embargo, para la operación con cargas altas son necesarias temperaturas más frescas de la envoltura refrigerante del motor con objeto de evitar la pre-ignición incontrolada.
- Los pistones pueden ser cambiados por unos de aleación eutéctica fundida (mezcla eutéctica: mezcla de 2 o más elementos que tiene un punto de fusión menor a cualquiera de los elementos que la componen) para que soporten los picos de presión que pueden alcanzar los 12MPa mucho mayores a las presiones pico operativas normales de producción de un motor (7-8 MPa). Además, se han cambiado los anillos del pistón por unos de aleación eutéctica más anchos, se han sustituido los bulones por unos de mayor diámetro, se han intercambiado las bielas por unas más cortas para aceptar los cambios previos y para prevenir su pandeo cuando se incrementa la carga, fue usado el cojinete de la biela de producción como se muestra en la figura 3.5[14].
- Los anillos del pistón: La tensión del anillo, el perfil y el material fueron optimizados para promover un sellado efectivo resistente al rayado debido a las diferencias intrínsecas entre el combustible de hidrógeno y la gasolina.

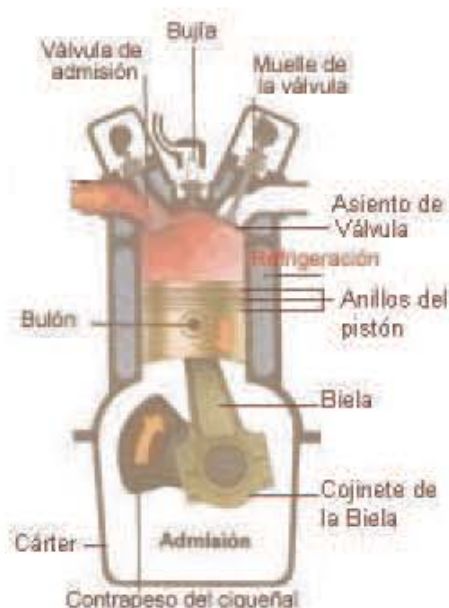


Figura 3.5 Ubicación de Elementos que se han modificados en el interior del cilindro.

- Válvulas y asientos: En el caso de combustibles gaseosos tradicionales (por ejemplo, Gas natural comprimido) el retroceso del asiento de la válvula puede ser una característica en los motores de combustión interna a hidrógeno debido a la falta de lubricación del combustible. Para minimizar el retroceso, el inserto del asiento de la válvula de producción fue cambiado por uno de acero endurecido con un rango de dureza Rockwell C. 50-60. Un asiento Stellite fue agregado a las válvulas de admisión y escape para incrementar la resistencia al uso.[14] en la figura 3.6 se muestra un detalle del accionamiento de las válvulas.[15]
- Baja fuga de los vástagos de la válvula: Para limitar la cantidad de aceite que entra al puerto de admisión y escape debido a la lubricación del sello del vástago de la válvula, los sellos de producción grado dos se remplazaron por sellos grado uno. Un recubrimiento tipo diamante (DLC Diamond Like Coating) fue aplicado a los vástagos de las válvulas para prevenir cualquier rayado debido a la disminución del flujo de aceite.

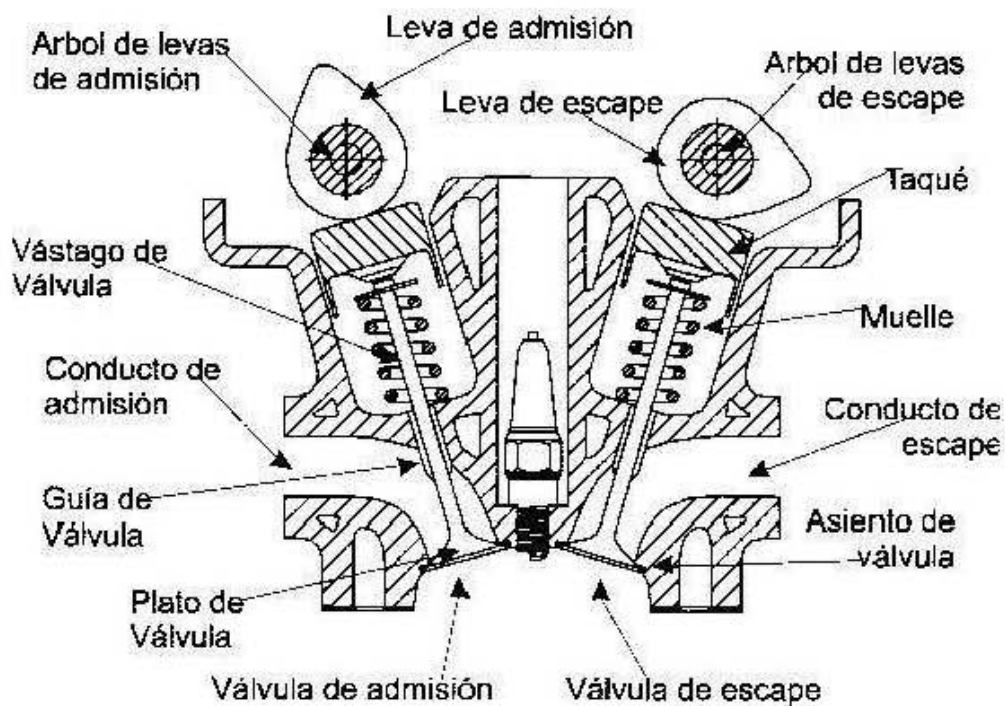


Figura 3.6 se muestra un detalle del accionamiento de las válvulas.

- El control del aceite en un motor de combustión interna a hidrógeno es crucial puesto que el aceite lubricante es la única fuente de emisiones basadas en carbón y una posible fuente de pre-ignición [16].
- Rectificado del cilindro: El bloque del cilindro fue finamente rectificado con una máquina rectificadora para minimizar la distorsión en el ensamble del pistón, (cilindrada promedio de 6-7 μm). El proceso de rectificado fue estrictamente controlado para producir una superficie rectificada fina pico consistente con la geometría deseada.
- Sistema de ventilación positiva del Cárter: El sistema estándar PCV fue modificado para operar a niveles mayores y menores de presión absoluta del múltiple (MAP), vea la figura

3.7. Un separador altamente efectivo de estilo de unión aire-aceite fue integrado flujo abajo de la válvula PCV. El aceite es separado de los vapores del cárter dentro del separador de unión y es drenado por gravedad, a través de una válvula check integral y un tubo de drenado, al colector de aceite del motor cuando el motor es apagado. El lado de la salida del separador es conectado a la garganta del flujo superior del venturi del super-cargador y a la entrada del flujo del múltiple debajo de la garganta. Las válvulas check de un solo sentido fueron ubicadas en las líneas conectores del venturi y de la entrada del múltiple para eliminar “contra flujo” durante toda la operación del motor.[14]

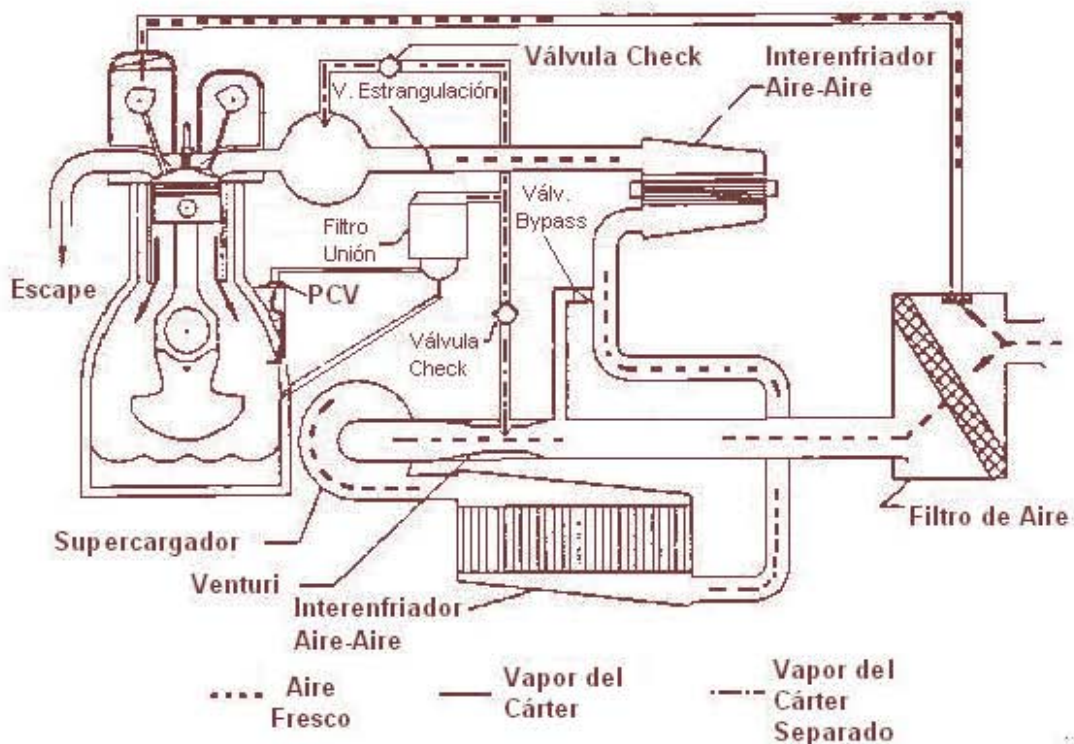


Figura 3.7 Sistemas PCV y de admisión.

3.3.2 Sistema de inyección de combustible

El sistema de entrega de combustible de hidrógeno se puede analizar en tres tipos principales: inyección central (o "carburada"), inyección multipunto e inyección directa.

En el caso de la inyección central o de un carburador, la inyección está en la entrada del múltiple de admisión de aire. En el caso de la inyección multipunto, se inyecta en el puerto de entrada. La inyección directa del cilindro se sofisticada e implica más desarrollo tecnológico al formar la mezcla aire-combustible dentro del cilindro después de que la válvula de admisión de aire se ha cerrado.

Sistema de Inyección Central o Carburada

El método más simple de entregar el combustible a un motor a hidrógeno es el de carburador o sistema de inyección central. Este sistema tiene ventajas para un motor a hidrógeno. En primer

lugar, la inyección central no requiere que la presión de la fuente del hidrógeno sea tan alta como para otros métodos. En segundo lugar, la inyección o los carburadores centrales se utilizan en motores a gasolina, haciendo fácil convertir un motor estándar a gasolina a un motor a hidrógeno o a un motor de gasolina /hidrógeno.

La desventaja de la inyección central es que es más susceptible a la combustión irregular debida a la pre-ignición y al golpeteo. La mayor cantidad de mezcla de hidrógeno /aire dentro del múltiple de admisión reúne las condiciones para la pre-ignición.

Sistema De Inyección Multipunto

El sistema de inyección multipunto de combustible inyecta el combustible directamente en el múltiple de admisión en cada puerto de admisión, en lugar de en un punto central. Típicamente, el hidrógeno se inyecta en el múltiple después del principio del tiempo de admisión. A este punto las condiciones son mucho menos severas y la probabilidad para la ignición prematura se reduce.

En la inyección multipunto, el aire se inyecta por separado al principio del tiempo de admisión para diluir los gases residuales calientes y para refrescar cualquier punto caliente. Puesto que menos gas (hidrógeno o aire) está en el múltiple en cualquier momento, cualquier pre-ignición es menos severa. La presión de la fuente de hidrógeno para la inyección multipunto tiende para ser más alta que para los sistemas de inyección centrales, pero menor que para los sistemas de inyección directos.

El sistema de inyección de volumen constante (CVI constant volume injection) utiliza un dispositivo mecánico operado por leva para medir el tiempo de la inyección del hidrógeno a cada cilindro.

El sistema de inyección electrónica de combustible IEC (EFI electronic fuel injection) mide el hidrógeno en cada cilindro. Este sistema utiliza los inyectores de combustible electrónicos individuales (válvulas de solenoide) para cada cilindro y el combustible se envía a un carril común localizado abajo del centro del múltiple de admisión. Mientras que el sistema CVI utiliza el tiempo de inyección constante y la presión variable del carril de combustible, el sistema de IEC utiliza la variación del tiempo de inyección y una presión constante del carril del combustible.

Sistema De Inyección Directa

Los motores a hidrógeno más sofisticado usan la inyección directa de hidrógeno en el cilindro durante el tiempo de compresión. En la inyección directa, la válvula de admisión está cerrada cuando el combustible se inyecta, evitando totalmente la ignición prematura durante el tiempo de admisión. Por lo tanto el motor no puede golpetear en el múltiple de admisión.

La salida de potencia de un motor de inyección directa de hidrógeno es 20% más que para un motor de gasolina y 42% más que un motor a hidrógeno usando un carburador. Figura 3.10

Mientras que la inyección directa soluciona el problema de la pre-ignición en el múltiple de admisión, no necesariamente previene la pre-ignición dentro de la cámara de combustión. Además, debido al reducido tiempo de mezclado del aire y del combustible en un motor de inyección directa, la mezcla aire /combustible puede ser no-homogénea. Estudios han sugerido que esto puede conducir a emisiones más altas de NOx que con sistemas de inyección no directa. Los sistemas de inyección directa requieren una presión más alta del carril de combustible que los otros métodos.

3.3.2.1 Características positivas del hidrógeno en aplicaciones en el sistema de inyección de combustible de motores

Algunas de las características más notables, asociadas con el uso de hidrógeno en el sistema de inyección de combustible de motores, son las siguientes:

- ✓ El límite operacional de la mezcla pobre en un motor de combustión interna cuando es alimentado con hidrógeno es mucho más bajo que para otros combustibles, como se muestra en la figura 3.8 para un rango de relaciones de compresión. Esto permite una operación estable con mezclas pobres y control en motores impulsados con hidrógeno.

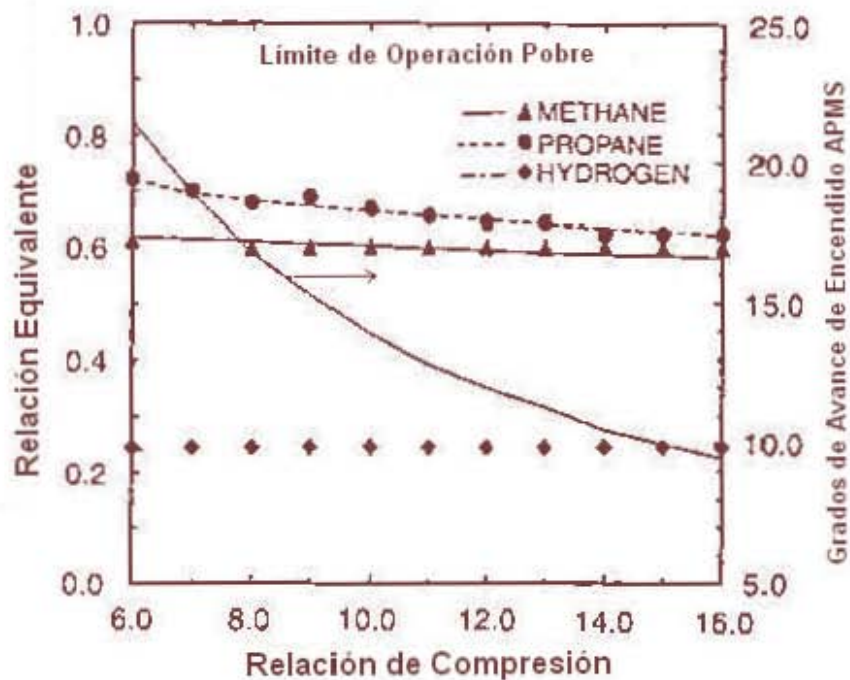


Figura 3.8 Variaciones de los límites de operación con cambios en la relación de compresión para diferentes combustibles gaseosos a 900 rpm [4]

- ✓ La operación con mezclas pobres, en combinación con la liberación de energía por la rápida combustión alrededor del punto muerto superior PMS asociado con la muy rápida quema de las mezclas de hidrógeno –aire resulta en valores altos de eficiencia de salida de potencia [5]. Por supuesto que, tal operación con mezcla pobre trae simultáneamente una salida de potencia más baja para cualquier tamaño de motor, como se ilustra en la figura 3.9.

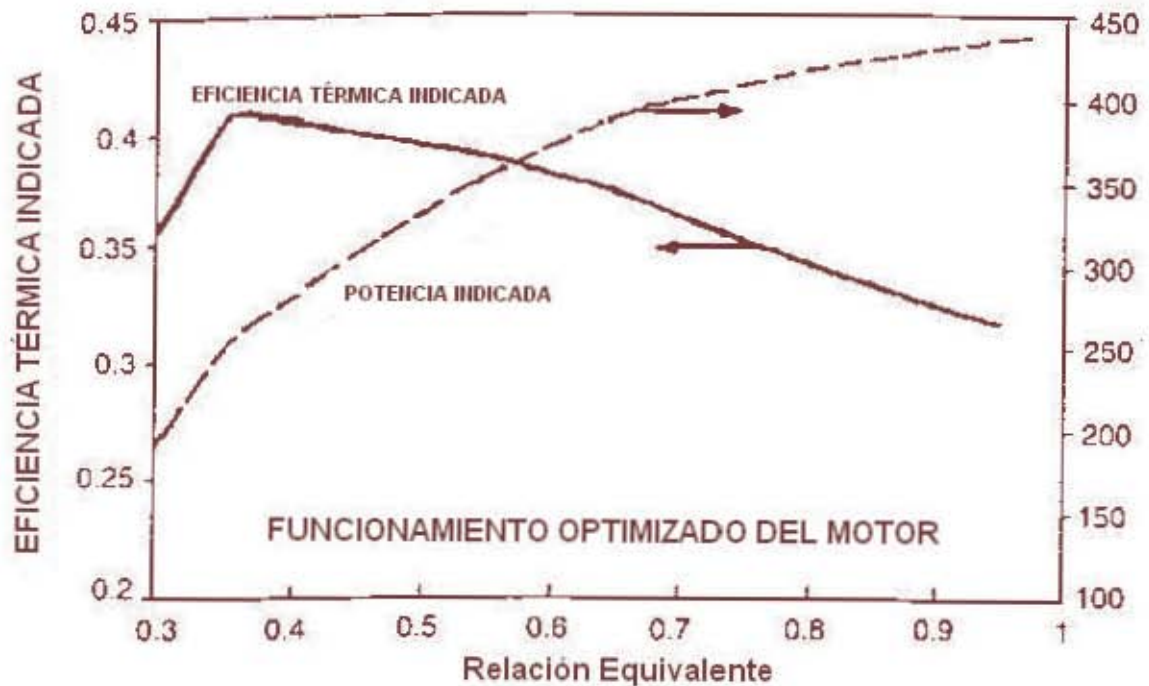


Figura 3.9 Variaciones típicas en la salida de potencia indicada y en la eficiencia de la operación con relación equivalente pobre de hidrógeno usando tiempo de encendido de chispa óptimo.[5]

- ✓ El hidrógeno puede ser empleado de modo eficaz con aire enriquecido con oxígeno como el resultante de la electrolisis del agua.

3.3.2.2 Algunas limitaciones asociadas con la aplicación del hidrógeno en el sistema de inyección de combustible de motores

Se listan algunas características, asociadas con el hidrógeno como combustible en el sistema de inyección de motores, que deben ser consideradas para realizar alguna acción de remedio:

- La masa del aire de entrada es reducida para cualquier tamaño de motor por la relativamente alta relación estequiométrica aire – hidrógeno.
- Relación Aire / Combustible: La combustión teórica o estequiométrica del hidrógeno y el oxígeno está dada por:



Moles de H_2 para completar la combustión = 2 moles

Moles de O_2 para completar la combustión = 1 mole

Puesto que en lugar de oxígeno se utiliza aire como oxidante, el nitrógeno en el aire necesita ser incluido en el cálculo:

$$\begin{aligned} \text{Moles de N}_2 \text{ en el aire} &= \text{Moles de O}_2 \times \left(\frac{79\% \text{ N}_2 \text{ en el aire}}{21\% \text{ O}_2 \text{ en el aire}} \right) \\ &= 1 \text{ mole de O}_2 \times \left(\frac{79\% \text{ N}_2 \text{ en el aire}}{21\% \text{ O}_2 \text{ en el aire}} \right) \\ &= 3.762 \text{ moles de N}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{No. De Moles de Aire} &= \text{Moles de O}_2 + \text{Moles de N}_2 \\ &= 1 + 3.762 \\ &= 4.762 \text{ moles de aire}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Peso del O}_2 &= 1 \text{ mole de O}_2 \times 32 \text{ g/mole} \\ &= 32 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Peso del N}_2 &= 3.762 \text{ moles de N}_2 \times 28 \text{ g/mole} \\ &= 105.33 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Peso del Aire} &= \text{Peso del O}_2 + \text{Peso del N}_2 \\ &= 32 \text{ g} + 105.33 \text{ g} \\ &= 137.33 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Peso del H}_2 &= 2 \text{ moles de H}_2 \times 2 \text{ g/mole} \\ &= 4 \text{ g}\end{aligned}$$

La relación estequiométrica aire / combustible (A / C) para el hidrógeno y el aire es:

$$\begin{aligned}\text{A / C base masa} &= \text{masa de aire} / \text{masa de combustible} \\ &= 137.33 \text{ g} / 4 \text{ g} \\ &= 34.33 : 1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{A / C base volumen} &= \text{volumen (moles) de aire} / \text{volumen (moles) de combustible} \\ &= 4.762 / 2 \\ &= 2.4 : 1\end{aligned}$$

El porcentaje de la cámara de combustión ocupada por el hidrógeno para una mezcla estequiométrica:

$$\begin{aligned}\% \text{ H}_2 &= \text{volumen (moles) de H}_2 / \text{volumen total} \\ &= \text{volumen de H}_2 / (\text{volumen de aire} + \text{volumen de H}_2) \\ &= 2 / (4.762 + 2) \\ &= 29.6 \%\end{aligned}$$

Como estos cálculos demuestran, el cociente estequiométrico o químicamente correcto de A/C para la combustión completa del hidrógeno en aire es cerca de 34:1 en base de masa. Esto significa que para la combustión completa, 34 kilogramos de aire se requiere para cada kilogramo de hidrógeno. Esto es mucho más alto que el cociente de 14.7:1 A/C requerido para la gasolina.

3.3.2.3 Algunas medidas para mejorar las características operativas en el sistema de inyección de combustible de motores a hidrógeno de ignición por chispa.

Las opciones que se han empleado en algunas investigaciones y otras que se concluyó que serán necesarias para el óptimo funcionamiento del motor a hidrógeno son:

- Puesto que el hidrógeno es un combustible gaseoso, en condiciones ambiente, ocupa más espacio de la cámara de combustión que un combustible líquido. Por lo tanto menos de la cámara de combustión se puede ocupar por el aire. En condiciones estequiométricas, el hidrógeno desplaza cerca del 30% de la cámara de combustión, comparado con cerca del 1 al 2% para la gasolina. La figura 3.10 compara volúmenes de la cámara de combustión y el contenido en energía para la gasolina y los motores adaptados a hidrógeno.

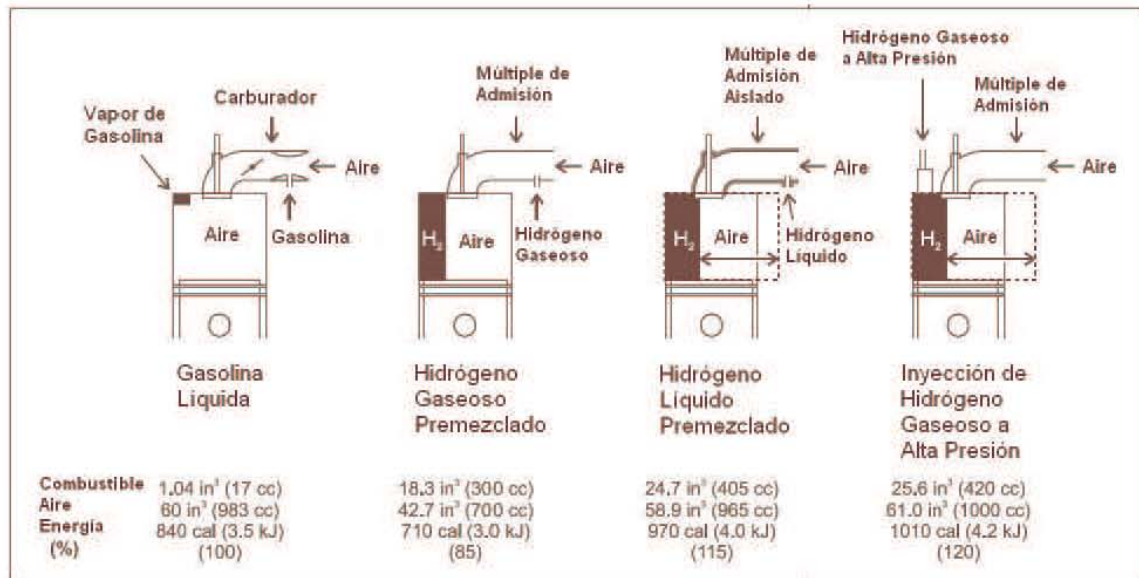


Figura 3.10 *Volumen de la Cámara de combustión y comparación de energía para motores a gasolina e hidrógeno, elaborada con datos de [20]*

- Dependiendo del método usado para introducir el hidrógeno al motor, la salida de energía comparada con un motor de gasolina puede ser desde el 85% (inyección en el múltiple de admisión) hasta el 120% (inyección de alta presión).
- Utilizar mezclas pobres con la válvula de estrangulación bien abierta. Lo que significa que se deben proporcionar los medios para aplicar estrangulación parcial variable óptima en las mezclas extremadamente magras para efecto del mejor funcionamiento del motor.
- La inyección del gas hidrógeno dentro del cilindro se puede emplear para producir mezclas adecuadamente estratificadas para un mejor funcionamiento y emisiones de escape reducidas.
- La eficiencia volumétrica necesita ser maximizada para realzar la salida de potencia.
- Deben de ser utilizados únicamente turbo-cargadores especialmente diseñados o compatibles con la aplicación de hidrógeno en motores.
- Debido a la amplia gama de inflamabilidad del hidrógeno, los motores a hidrógeno pueden funcionar en cocientes de A/C a partir de 34:1 (estequiométrico) hasta 180:1. El cociente de A/C se puede también expresar en términos de la relación equivalente, denotada por la phi (Φ). La phi es igual a la relación estequiométrica de A/C dividida por el cociente real de A/C. Para una mezcla estequiométrica, el cociente real de A/C es igual al cociente estequiométrico de A/C y la phi es igual a la unidad. Para los cocientes pobres de A/C, la phi será menor a uno. Por ejemplo, una phi de 0.5 significa que hay solamente suficiente

combustible disponible en la mezcla para oxidar sólo la mitad del aire presente. Otra manera de decir esto es que hay dos veces más aire disponible para la combustión del que se requiere teóricamente.

Hay en el mercado inyectores de combustible para gas natural que pueden ser compatibles con hidrógeno, para el caso de la marca IMPCO cuenta con inyectores QUANTUM que tienen las siguientes características[17]:

- Capacidad de flujo: 1.2 g/s de Hidrógeno @ 483 – 552 kPa
- Vida útil 500 millones de ciclos
- Compatible con: Gas Natural Comprimido, Gas LP

3.3.3 Sistema de almacenamiento de combustible

Si el mayor reto en el uso del hidrógeno es el extraerlo, el segundo gran reto es como almacenarlo. Como se vio en la sección 3.1, el hidrógeno tiene la menor densidad de los gases, la segunda más baja temperatura de ebullición de todas las sustancias conocidas, haciendo que almacenar hidrógeno en forma gaseosa o líquida sea un reto. Almacenarlo como un gas requiere de volúmenes grandes de almacenamiento y de altas presiones. Almacenarlo como un líquido requiere de un sistema de almacenamiento criogénico.

Para un volumen dado el hidrógeno contiene menor cantidad de energía que el mismo volumen de otros combustibles. Esto incrementa el tamaño relativo del tanque de almacenamiento, puesto entre mayor sea la necesidad de hidrógeno mayor será la dimensión del tanque. Por lo que, la mayoría de los sistemas de almacenamiento son considerablemente más pesados y /o voluminosos que aquellos usados para gasolina o diesel.

Para prácticamente todas las aplicaciones, el hidrógeno puede ser almacenado como un gas a alta presión, como un líquido en contenedores criogénicos, o como un gas químicamente vinculado a ciertos metales (hidruros). El volumen y peso de estos sistemas es comparado, en la figura 3.11, con sistemas de almacenamiento de gasolina metanol y baterías, caja uno contiene 1,044,500 kJ de energía almacenada; equivalente a 31.8 litros de gasolina.

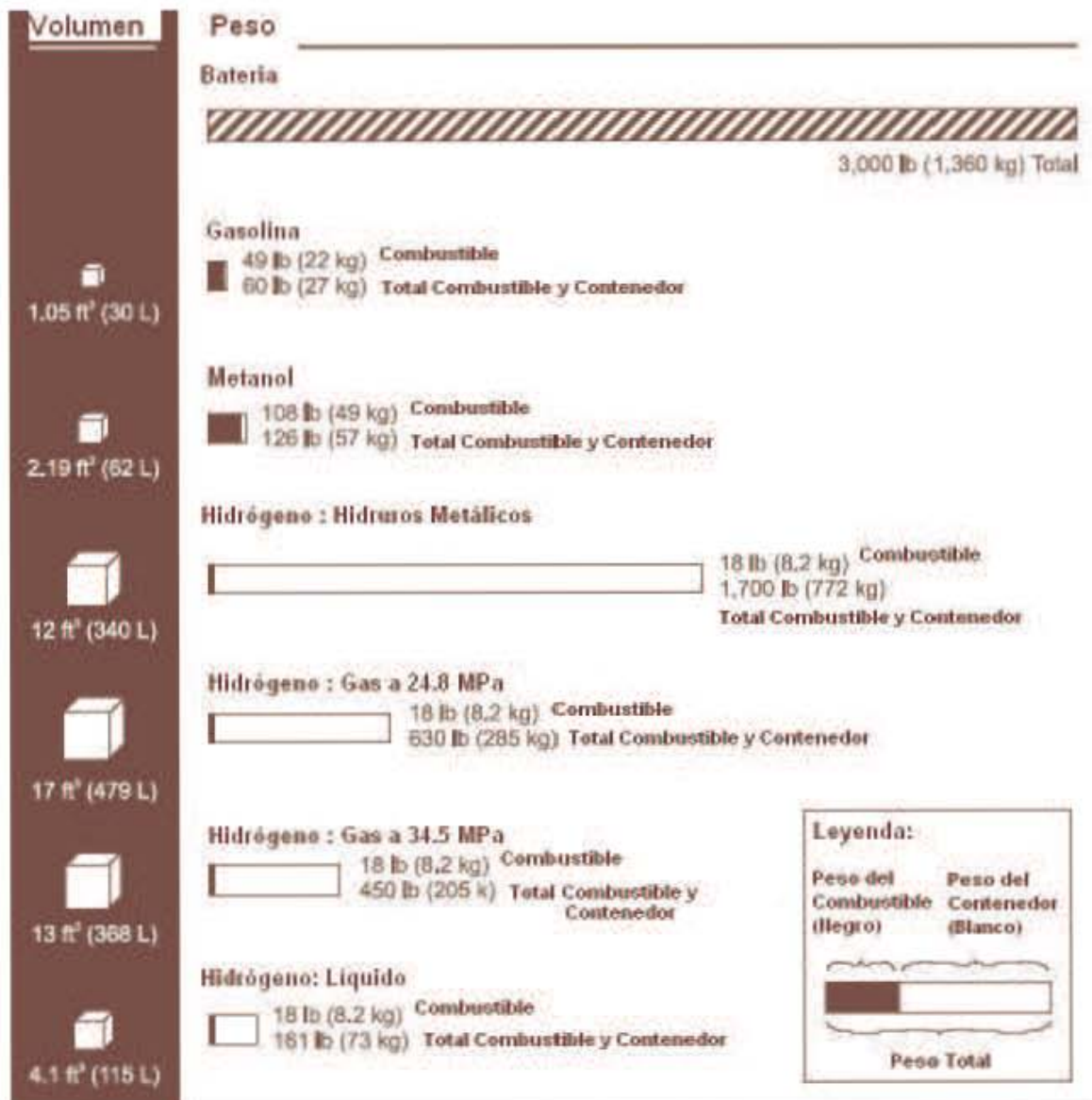


Figura 3.11 Comparación de Almacenamiento, Volumen y Peso de varios combustibles cada uno con 1,044.5 MJ de energía almacenada, elaborada con datos de [20]

Irónicamente, la mejor forma de almacenar hidrógeno es en la forma de combustibles de hidrocarburos aunque se requiera de sistemas adicionales para extraerlo.

3.3.3.1 Gas a alta presión

Los sistemas de almacenamiento a alta presión son los más comunes y cuyos métodos de almacenamiento están más altamente desarrollados.

El hidrógeno a alta presión es almacenado en cilindros, similares a los usados para gas natural. La mayoría de los cilindros tienen una sección de forma cilíndrica con domos terminales hemisféricos. El hidrógeno como un gas comprimido a 200 atmósferas (20 MPa) y temperatura ambiente tiene

simplemente cerca del 5% de la energía de la gasolina en el mismo volumen. Este es un defecto particularmente para aplicaciones de transporte, pero es un hecho con el que también lidia la celda de combustible.

En un sistema de almacenamiento de hidrógeno, que será utilizado como combustible en máquinas de combustión interna para generar electricidad, se deben considerar ciertos parámetros que indiquen las características de cada medio de almacenamiento para que en base a esta información se determine cuál es el sistema óptimo de almacenamiento de hidrógeno para generar una cantidad dada de energía eléctrica.

3.3.3.2 Comparación entre varios sistemas de almacenamiento de combustible.

Los valores presentes, como se muestran en la figura 3.12, son estimaciones dadas por desarrolladores y por la comunidad de investigación y desarrollo en sistemas de almacenamiento de hidrógeno y han sido recopilados por el programa de hidrógeno del DOE en el año fiscal 2004, los cuáles serán actualizados continuamente; puesto que resulta difícil estimar el nivel del peso y volumen del sistema cuando la investigación está aun en etapa de desarrollo de materiales.

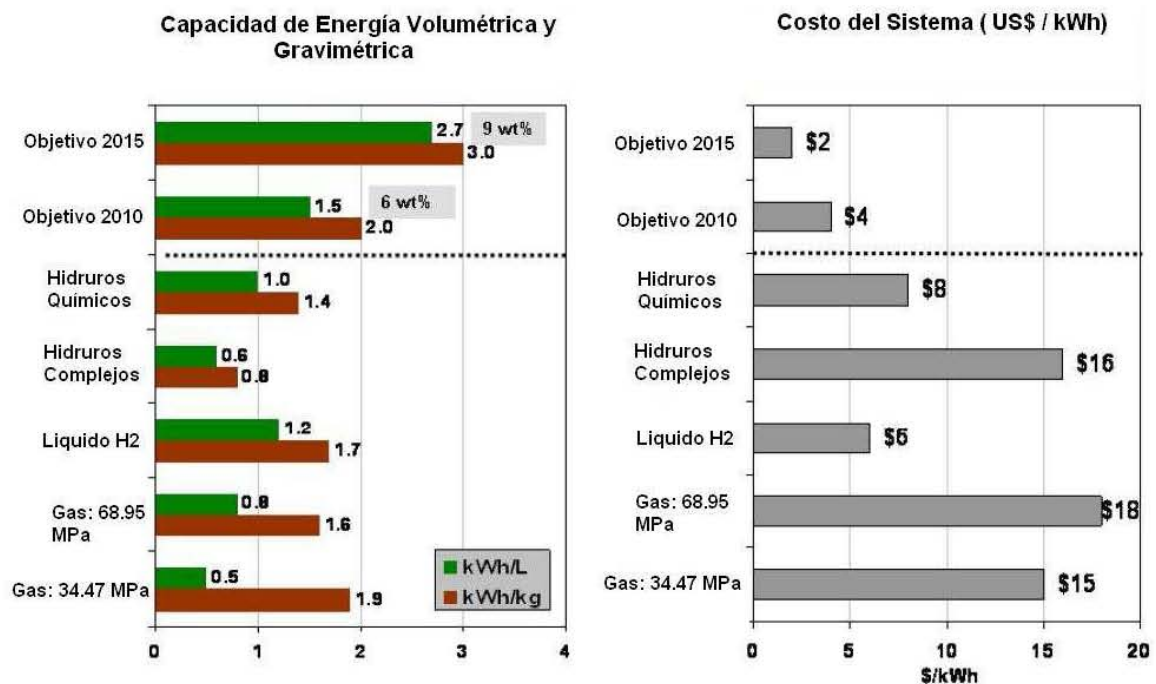


Figura 3.12 Comparación Volumétrica, Gravimétrica y de Costos de varios sistemas de almacenamiento de Hidrógeno, elaborada con datos de [18].

Sin embargo, es claro que ninguno de los sistemas actuales cumple con los objetivos combinados de costo del sistema, capacidad de energía volumétrica y gravimétrica que se han fijado para el 2010 o 2015 por el DOE.

Si se considera que un equipo de generación de electricidad que utilice hidrógeno no restringe la capacidad de energía volumétrica y gravimétrica y más bien se centra en la disponibilidad de la tecnología y su costo por unidad de almacenamiento de energía, se tiene por ejemplo la opción real y

disponible en el mercado de tanques que almacenan hidrógeno a alta presión, con las siguientes parámetros de la tabla 3.3, realizada con información de [18][19][20]:

Tabla 3.3 Comparación de cilindros a alta presión para almacenar Hidrógeno

Presión (MPa)	US \$ / kWh	kWh / L	KWh / kg
34.47	20.22	0.5	1.95
41.37 ^a	35.13	-	-
50	29.19	-	1.47

a. Cilindros Estacionarios.

Una forma útil de entender el costo energético de la compresión del hidrógeno es como un porcentaje del total del contenido energético (LHV) del hidrógeno que es almacenado. En estos términos, aproximadamente el 5% del LHV es empleado para comprimir el gas a 34.47 MPa. La energía exacta usada depende de la capacidad de flujo y de la eficiencia de los compresores utilizados.

3.3.4 Sistema de ignición de combustible

Debido a la baja energía de ignición del hidrógeno, encender el hidrógeno es fácil y los sistemas de ignición de la gasolina pueden ser utilizados. En los cocientes aire /combustible muy magros (130:1 a 180:1) la velocidad de la flama se reduce considerablemente y se prefiere el uso de un sistema dual de bujía. Los sistemas de ignición que utilizan un sistema de desgaste de la bujía no se deben utilizar para los motores a hidrógeno. Estos sistemas energizan la chispa cada vez que el pistón está en el centro del punto muerto superior PMS esté o no el pistón en el tiempo de compresión o en su tiempo de escape. Para los motores a gasolina, los sistemas de desgaste de la bujía trabajan bien y son menos costosos que otros sistemas. Para los motores a hidrógeno, los sistemas de desgaste de la bujía son una fuente de pre-ignición.

Las bujías para un motor a hidrógeno deben tener un grado frío y tener electrodos libres de platino. Una bujía de clasificación fría es una que transfiere calor del extremo de la bujía hacia la culata más aprisa que una bujía de clasificación caliente. Esto significa que se reduce la probabilidad de que el extremo de la bujía encienda la carga aire /combustible. Las bujías de clasificación caliente se diseñan para mantener cierta cantidad de calor de modo que los depósitos de carbón no se acumulen. Puesto que el hidrógeno no contiene carbón, una bujía de clasificación caliente no realizan una función útil. Debe evitarse utilizar bujías con electrodo de platino puesto que el platino es un catalizador, haciendo que el hidrógeno se oxide con el aire.

Algunas de las características más notables, asociadas con el uso de hidrógeno en el sistema de ignición de combustible de motores, son las siguientes:

- ✓ La variación del tiempo de encendido en la operación del motor con hidrógeno representa un medio efectivo e inusual para mejorar la actuación del motor y evitar la incidencia de golpeteo. Se ilustra en la figura 3.13. También, las características de transferencia de calor de la combustión del hidrógeno en motores son significativamente diferentes de aquellas en motores operando con otros combustibles. El componente de radiación de la transferencia de

calor tiende a ser pequeño puesto que el componente de convección puede ser mayor especialmente para operación con mezcla pobre.

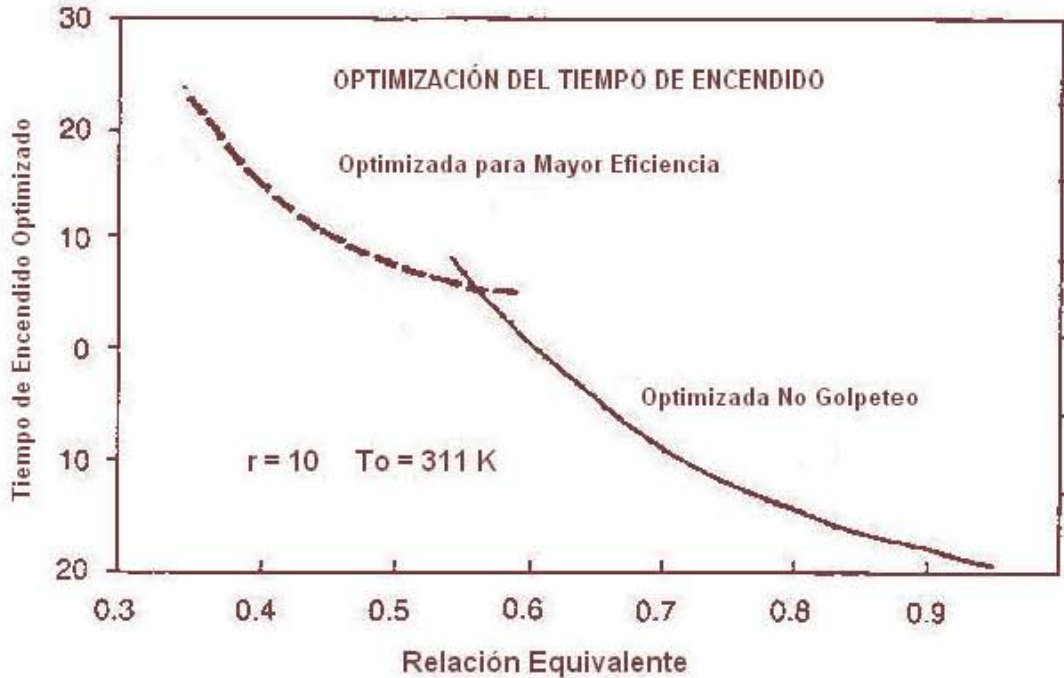


Figura 3.13 Variaciones típicas en el tiempo de encendido (en ° de cigüeñal APMS) y la ausencia de golpeteo para operación con mezcla pobre de hidrógeno[5]

- ✓ El hidrógeno tiene un número de octano altamente efectivo principalmente por su coeficiente de combustión alto y su baja reactividad de pre ignición por compresión.
- ✓ El hidrógeno ha sido mostrado como un excelente aditivo en concentraciones relativamente pequeñas, para algunos combustibles comunes como el metano[9].
- ✓ Su estado gaseoso permite excelente encendido del motor en frío.
- ✓ Se necesita menos grados de avance del encendido, lo que contribuye a una mejor eficiencia y una salida de potencia mejorada.
- ✓ Los coeficientes de las reacciones del hidrógeno son sensibles a la presencia de un amplio rango de catalizadores. Esta característica ayuda a mejorar su combustión y el tratamiento de sus emisiones de escape.

Se listan algunas características, asociadas con el hidrógeno como combustible en el sistema de ignición de motores, que deben ser consideradas para realizar alguna acción de remedio:

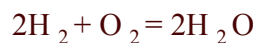
- El hidrógeno requiere una energía de ignición muy baja, lo que trae problemas incontrolados de pre-ignición.

Las opciones que se han empleado en algunas investigaciones y otras que se concluyó que serán necesarias para el óptimo funcionamiento del motor a hidrógeno son:

- Hay la necesidad, con el hidrógeno como combustible, de optimizar el tiempo de encendido para mejorar el funcionamiento del motor mientras se evita el golpeteo, como se muestra en la figura 3.13. La variación en el tiempo de encendido con hidrógeno es más efectiva en controlar los procesos de combustión que con otros combustibles.
- Es necesario emplear las características óptimas de: la ignición por chispa en términos de energía, el tamaño y material adecuado de la bujía de encendido, la geometría del electrodo de la bujía, y el aislamiento eléctrico, etcétera.
- Es preferible tener la inyección de hidrógeno controlada por tiempo si es dentro del múltiple o directamente dentro del cilindro, optimizar: la duración de la inyección, el tiempo de ignición y la presión. Esto es importante para evitar la pre-ignición y las contra explosiones. Considerar la inyección de agua cuando sea necesario hacerlo.[13]
- Hay también excelentes prospectos para realzar el proceso de la combustión dentro del cilindro del motor mediante la conveniente disposición de superficies catalíticas.
- En ocasiones, en que el sistema original de encendido no se pueda ajustar a las propiedades del hidrógeno, habrá de cambiarse el sistema de encendido por un paquete adecuado, o bien diseñar por cuenta propia uno que se ajuste a las características del motor y del hidrógeno.

3.3.5 Sistema de control de emisiones.

La combustión del hidrógeno con oxígeno produce sólo agua como producto:



Sin embargo, la combustión del hidrógeno con aire también puede producir óxidos de nitrógeno (NO_x):



Los óxidos de nitrógeno son creados debido a las altas temperaturas generadas dentro de la cámara de combustión durante la combustión. Esta temperatura alta causa que algo del nitrógeno en el aire se combine con el oxígeno del aire. La cantidad de NO_x formada depende:

- El cociente aire /combustible
- El cociente de compresión del motor
- La velocidad del motor
- El tiempo de encendido de la ignición
- Si se utiliza la dilución termal

Además de los óxidos del nitrógeno, pueden estar presentes en el gas de escape rastros de monóxido de carbono y de bióxido de carbono, debido a la quema de aceite que se ha filtrado en la cámara de combustión. Dependiendo de la condición del motor (al quemarse el aceite) y de la estrategia de funcionamiento usada (cociente aire /combustible pobre & rico), un motor a hidrógeno puede producir desde casi cero emisiones (tan bajo como algunas PPM) hasta altas emisiones de NO_x y emisiones significativas de monóxido de carbono.

La figura 3.14 ilustra típicamente una ϕ en relación con la curva de NOx para un motor a hidrógeno. Un gráfico similar que incluye otras emisiones se muestra en la figura 3.15 para la gasolina.

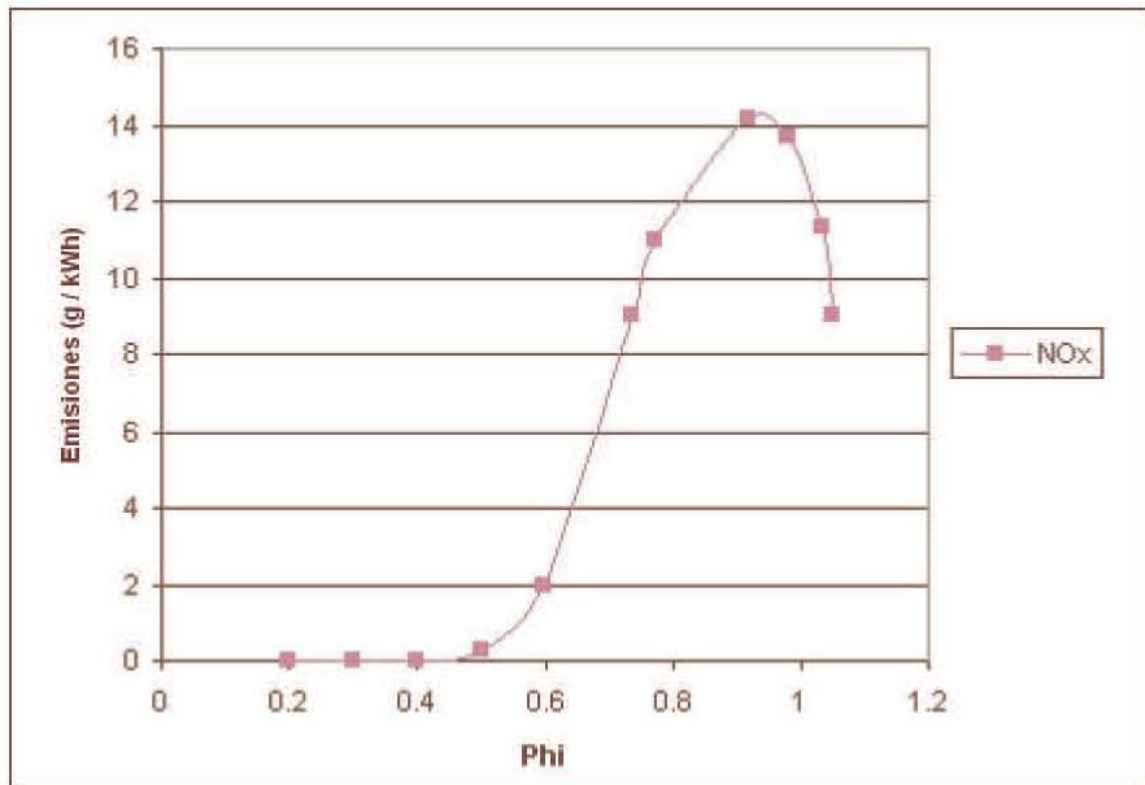


Figura 3.14 Emisiones de un motor a hidrógeno, elaborado con información de [20]

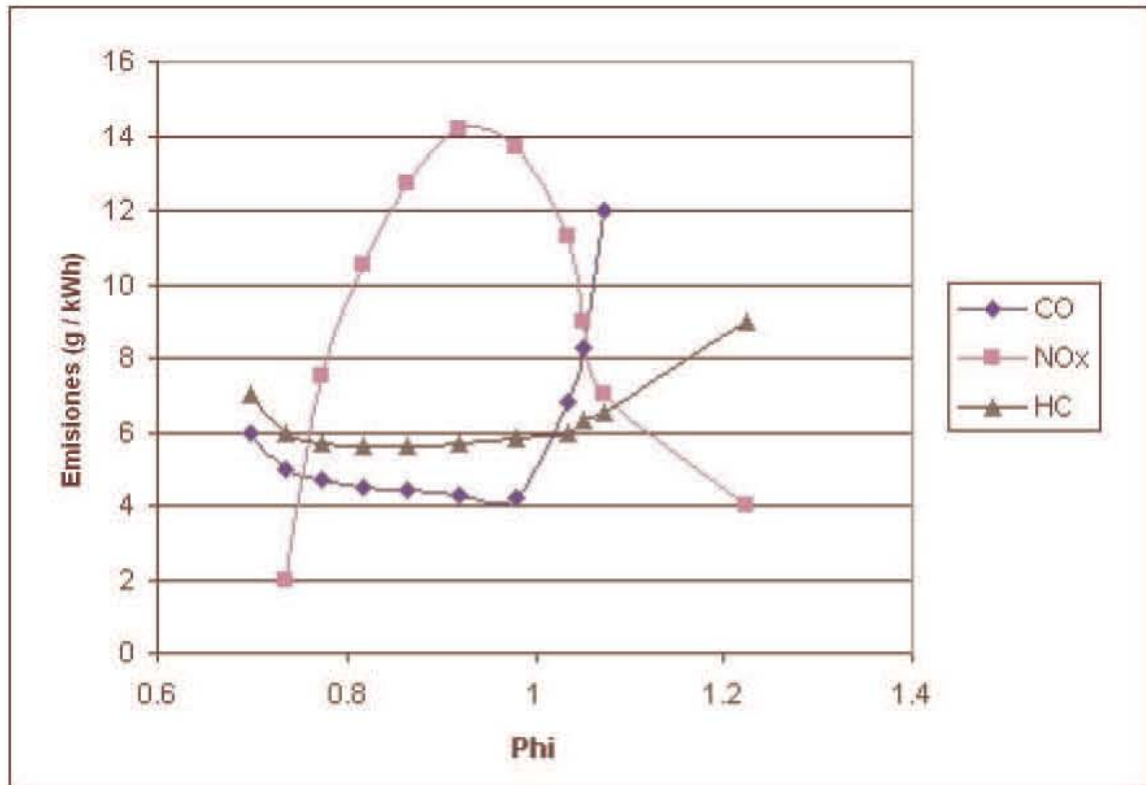


Figura 3.15 Emisiones de un motor a gasolina, elaborado con información de [20]

Como la figura 3.15 muestra, los NOx se reducen para un motor a gasolina mientras que la phi disminuye (similar a un motor a hidrógeno). Sin embargo, en un motor a gasolina la reducción en NOx está comprometida con un aumento en las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos.

Adicionalmente se comentan algunos rasgos positivos del hidrógeno, respecto a las emisiones en HICE:

- ✓ Una de las más importantes características de la operación del motor con hidrógeno es que sus emisiones de escape de gases indeseables son menores que cuando se opera con otros combustibles. Tanto que el hidrógeno como combustible, no contribuye con hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de azufre, ni humo o partículas[6]. La contribución del aceite lubricante del motor a tales emisiones, en motores con un buen mantenimiento, tienden a ser casi despreciables. Solamente los óxidos de nitrógeno y el vapor de agua son los principales productos emitidos de la combustión. También, con operación pobre el nivel de NOx tiende a ser significativamente menor que aquel encontrado con la operación de otros combustibles[7].
- ✓ Menores variaciones cíclicas son encontradas con el hidrógeno a diferencia de otros combustibles, incluso para operación con mezcla muy pobre. Esto trae consigo una reducción de las emisiones, mejora la eficiencia y se tiene una operación más silenciosa y suave.

Se listan algunas características, asociadas con el hidrógeno como combustible, con respecto a las emisiones, que deben ser consideradas para realizar alguna acción de remedio:

- Los altos coeficientes de quemado del hidrógeno producen presiones y temperaturas altas durante la combustión en motores cuando se operan cerca de las mezclas estequiométricas. Esto trae consigo emisiones de escape de óxidos de nitrógeno altas.
- Hay serias limitaciones en la aplicación de recirculación de gases de escape fríos para el control de las emisiones de escape.
- Siempre hay un potencial adicional de problemas de seguridad con la operación de hidrógeno[12].

Las opciones que se han empleado en algunas investigaciones y otras que se concluyó que serán necesarias para el óptimo funcionamiento del motor a hidrógeno son:

- El enfriamiento cuidadoso de los gases de escape para recirculación a la cámara de combustión puede ser aplicada para evitar y controlar el golpeteo. Para operación con mezclas pobres la recirculación de los gases de escape convenientemente calientes puede ser usada.
- Recurrir a métodos catalíticos para reducir las emisiones de escape de NOx y de hidrógeno no consumido. Ambos componentes de los gases de escape tienden a estar en muy bajas concentraciones, especialmente para operación con mezclas pobres. Debe asegurarse por completo que los lubricantes y los materiales son compatibles con hidrógeno.

3.3.6 Aspectos de seguridad en la utilización del hidrógeno

Algunas de las características más notables, que se deben tener en cuenta con el uso de hidrógeno como combustible de motores, son las siguientes:

- ✓ El gas es altamente difuso y boyante lo cual hace que las fugas de combustible se dispersen rápidamente, reduciendo el peligro de fuego y explosión asociado con la operación del motor a hidrógeno.

Se listan algunas características, asociadas con el hidrógeno como combustible, que deben ser consideradas para realizar alguna acción de remedio:

- Se necesita de un gran cuidado para seleccionar materiales compatibles con la aplicación de hidrógeno en motores.
- En ciertas aplicaciones, como en climas muy fríos, el vapor de agua de los gases de escape puede ser una característica indeseable porque empobrece la visibilidad e incrementa los problemas de congelamiento.
- La sensibilidad a la acción catalítica de las mezclas de hidrógeno-aire se puede considerar ocasionalmente indeseable si contribuye a reducir la seguridad y disminuye el control del proceso de combustión (bujías con platino).

Las opciones que se han empleado en algunas investigaciones y otras que se concluyó que serán necesarias para el óptimo funcionamiento del motor a hidrógeno son:

- Las medidas de seguridad apropiadas se deben mantener bajo todas las condiciones y panoramas posible de funcionamiento.

REFERENCIAS

- [1].- Rose JW, Cooper JR. Technical Data on Fuels. Edinburgh, UK: Scottish Academic Press, 1977
- [2].- Erren RA, Campell WH. Hydrogen a Comercial fuel for internal combustion engines and other purposes. J. Inst. Fuel 1933; 6:277-90.
- [3].- Al Alousi Y. Examination of the combustion processes and performance of a spark ignition engine using a data acquisition system. PhD thesis, University of Calgary, Mechanical Engineering, November 1982.
- [4].- Bade Shrestha, Karim GA, Wierzba I. Examination of operational limits in gas fueled spark ignition engines. SAE paper No. 2000-01-1944.-SP-1549
- [5].- Li H, Karim GA. Experimental and predictive performance of a S.I. engine, para ser publicado
- [6].- Das LM. Exhaust emission characterization of hydrogen operated engine system. Int. J. Hydrogen Energy 1990; 15:833.
- [7].- Shioji M, Inoue N. Performance and NOx formation in a hydrogen premixed –charge engine. Proceedings of 12th World Hydrogen Conference, Buenos Aires, Argentina, 1998. p.1469-78.
- [8].- Shioji M, Islayama T. Feasibility of the high speed hydrogen engine. International Symposium on Hydrogen Energy. Osaka, Japan, January 2002 p.1-9.
- [9].- Karim GA, Wierzba I, Al-Alousi Y. Methane –hydrogen mixtures as fuel. Int. Hydrogen Energy 1996;21:625-34.
- [10].- Sierens R, Rosseel E. Backfire mechanism in a carburetted hydrogen fuelled compression ignition engine. Proceedins of the 12 World Hydrogen Conference, Buenos Aires, Argentina, 1998. p.341-53.
- [11].- Karim GA, Klat SR. The knock and autoignition characteristics of some gaseous fuels and their mixtures. J. Inst. Fuel 1966;39:109-19
- [12].- Hord J. Is hydrogen a safe fuel. Int. J. Hydrogen Energy 1978;3:157-76
- [13].- Norbeck JM et al. Hydrogen fuel for surface transportation. Warrendale, Mich., USA: SAE, 1996.
- [14].- Hydrogen IC Engine Boosting Performance and NOx Study. Robert J. Natkin, Xiaoguo Tang et al. 2003 - 01-0631 University of California-Riverside.
- [15].- Jesús Andrés Álvarez Flórez, Callejón I., Máquinas Térmicas Motoras, Ed. Alfaomega, ed.1ª.2005
- [16].- Stockhausen, et al, “Ford P2000 Hydrogen Engine Design and Vehicle Development Program”, SAE 2002-01-0240.
- [17].- Fuel Injectors, Fuel Metering. QUANTUM Technologies. www.impcotechnologies.com
- [18].- III.0 Hydrogen Storage Sub-Program Overview, FY 2004 Progress Report, DOE Hydrogen Program.
- [19].- Atlantic Hydrogen - Hydrogen-fueled vehicles. <http://www.atlantichydrogen.net>
- [20].- Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies 2001. College of the Desert.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES

APLICACIÓN DEL HIDRÓGENO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.

En este capítulo se expondrá el sector de aplicación del hidrógeno para la generación de electricidad en máquinas de combustión interna dividiéndose en dos sectores principalmente: La generación centralizada, representada por centrales eléctricas grandes, alejadas de los centros de consumo y las centrales para generación distribuida caracterizadas por un tamaño adecuado al centro de consumo. Además, se presentarán las conclusiones del estudio de factibilidad tecnológica de la aplicación del hidrógeno como combustible en máquinas de combustión interna de acuerdo al ciclo termodinámico que las divide.

4.1 Principio de Generación de Energía Eléctrica

De manera tradicional, se han abastecido las necesidades de energía del mundo, en su mayor parte, con combustible fósiles. Las predicciones en boga indican que muchos países, entre ellos México, continuarán apoyándose en forma importante en estos combustibles.

Unos de los usuarios más grandes de los combustibles fósiles es la industria de generación de electricidad. La combustión de estos materiales produce vapor de agua a alta presión y alta temperatura, y éste se emplea para impulsar a una turbina a 3,600 rpm. La turbina impulsa un generador eléctrico, que produce voltaje, el cual es elevado mediante un transformador eléctrico hasta niveles de voltaje de transmisión 230 kV o 400 kV, la energía viaja por las líneas aéreas de transmisión hasta los centros de consumo donde en las subestaciones se disminuye el voltaje a nivel de distribución 13.8 kV, para transportar la energía por la ciudad o centro de consumo, donde cada cierto número de manzanas se instala un transformador eléctrico para disminuir el voltaje hasta el nivel de consumo 127 V.

La mayor parte de las centrales de generación en operación del sistema eléctrico nacional (SEN) utilizan hidrocarburos, como se comentó en el capítulo 1, entre las cuales sobresalen las térmicas convencionales alimentadas con combustóleo. En la última década, empresas y productores independientes de energía eléctrica en otros países han mostrado una creciente preferencia por los ciclos combinados, en razón de sus características especiales: bajos niveles de contaminación por utilizar gas natural, alta eficiencia térmica y construcción modular, así como menores requerimientos de inversión comparados con otras tecnologías.

Ante la perspectiva de encarecimiento del gas natural, es importante analizar escenarios diversificados con la posibilidad de incorporar centrales carbo, hidro, geotermo, eololéctricas, fotovoltaicas, etcétera, ya que de continuar el incremento relativo en su precio y de sostenerse éstos niveles altos, las otras opciones se vuelven competitivas.

El uso de carbón resulta atractivo tomando en cuenta que las centrales carboeléctricas constituyen una tecnología madura, es el energético primario con mayores reservas a nivel mundial, y el de mayor estabilidad en sus precios.

Sin embargo, dado que México no posee yacimientos carboníferos con un costo de extracción competitivo, de intensificarse su uso se incrementaría su importación.

Las ventajas más importantes de una estrategia de diversificación son: mayor protección contra la volatilidad de los precios de los energéticos primarios, eliminación de la dependencia de un proveedor único de combustible importado como el gas natural, y reducción de la contaminación atmosférica mediante el uso de fuentes renovables.

4.2 Sistema Eléctrico Centralizado

Un sistema eléctrico centralizado es aquel que aprovecha la economía de escala de una planta de generación, es decir, que la *economía de escala* se refiere al poder que tiene una empresa cuando alcanza un nivel óptimo de producción para ir produciendo más a menor costo, es decir, a medida que la producción en una empresa crece (Zapatos, bastones, energía eléctrica...) sus costos por unidad producida se reducen. Cuanto más produce, menos le cuesta producir cada unidad.

Sin embargo, también se tienen consideraciones adversas de las plantas de generación centralizada, entre las que se pueden mencionar:

- ✓ Equipamiento concentrado
- ✓ Alejado de centro de consumo
- ✓ Desperdicio de energía primaria
- ✓ Sensible a la economía

Si se parte de una política en la que las emisiones contaminantes de las centrales de generación sea un factor preponderante en la elección de la tecnología para generación eléctrica, se podría optar por el cierre de todas y cada una de las centrales térmicas convencionales y sustituirlas por centrales de ciclo combinado y energías renovables, pero, ¿es esto viable?. Posiblemente no a corto plazo, y además sería contraproducente, pues la importante dependencia del combustóleo, recurso nacional, quedaría relegada al gas natural, fuente energética exterior y energías renovables, dependientes de un factor incontrolable como es el clima. No quiere decirse que sean excluyentes, sino al contrario, se precisa de todas las posibilidades de generación existentes, asegurando así una mezcla diversificada y poco agresiva ante la desaparición de una fuente determinada. De este modo, existen dos razones para justificar una dependencia del combustóleo como combustible en generación de energía: la propiedad del recurso energético y la necesidad de diversificar la generación.

El mayor obstáculo de la utilización del hidrógeno en grandes cantidades para la generación de energía eléctrica o en el transporte es que es un vector energético, puesto que aunque es el elemento químico más abundante en la naturaleza no se encuentra libre por lo que es necesario separarlo de otros elementos que lo contienen, con el consiguiente consumo de energía. Sin embargo, si se busca una adecuada relación entre las emisiones y el costo de generación de electricidad, se debe aceptar que el hidrógeno obtenido a partir de la quema de combustibles fósiles es una opción muy competitiva, pero si se tiene una normatividad que restrinja los niveles de emisiones, se debe estudiar si aplicar tecnologías que disminuyan, eviten o capturen las emisiones, integradas a esquemas de generación de electricidad centralizada siguen siendo competitivas, o bien se debe recurrir a otras fuentes de energía primaria.

4.2.1 Iniciativa para la Investigación de la producción Integrada de Hidrógeno, electricidad y secuestro de carbono FutureGen

Se comenta un proyecto impulsado por el Departamento de Energía de Estados Unidos de América DOE-USA, que por un lado recurre a un energético abundante en su territorio, con un precio estable, y que puede ser utilizado para generar simultáneamente hidrógeno y electricidad, el carbón. Además de que plantea la premisa de adquirir independencia energética por medio del Hidrógeno y el secuestro de bióxido de carbono producto de la quema del carbón [1].

Resulta atractivo estudiar este proyecto por que cuenta con elementos que pueden mostrar como continuar utilizando combustibles nacionales como el combustóleo, crudos pesados o los fondos de barril por medio de su gasificación, para obtener hidrógeno y capturar las emisiones que contaminan algunas de nuestras ciudades.

Se ha hecho mucho trabajo en el intento de adaptar las turbinas de gas al uso de carbón mineral como combustible. La gasificación del carbón mineral, que se utiliza para depurarlo de contaminantes, tiene particular atractivo en vista de que el ciclo combinado de la turbina de gas puede integrarse en el proceso de gasificación para mejorar la eficiencia. El aire extraído de la turbina puede usarse como la fuente de oxidante para el proceso de gasificación, y el vapor producido en el proceso puede expandirse a través de la turbina de vapor. En la figura 4.1 se muestra un diagrama que muestra la forma en que se relacionarán los diversos componentes en un ciclo combinado integrado de gasificación (IGCC) y secuestro de carbono.

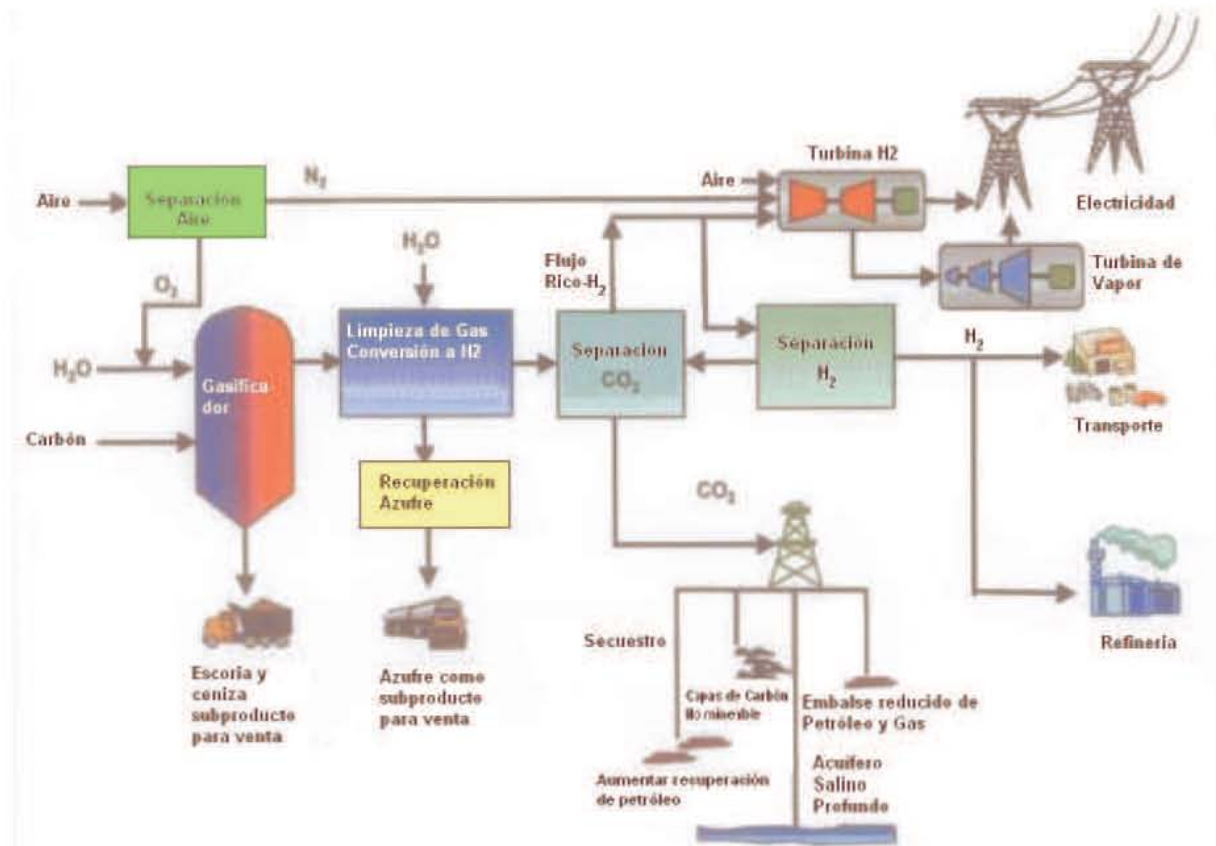


Figura 4.1 Relación de los componentes en un ciclo combinado integrado de gasificación y secuestro de carbono de la iniciativa FutureGen.

Resumen de la iniciativa para la investigación de la producción integrada de Hidrógeno, electricidad y secuestro de carbono FutureGen:

- ✓ Es un proyecto que inició en 2004 y terminará en 2018.
- ✓ Será una planta de 275 MW que producirá electricidad e hidrógeno.
- ✓ Secuestrará 1 millón de m^3 de CO_2 por año.
- ✓ Empleará tecnología avanzada de gasificación de carbón integrada con un ciclo combinado de generación y capturaré y secuestraré el CO_2 .
- ✓ Entrará en operación en 2011.
- ✓ Será en aproximadamente 6 años la planta termoeléctrica más limpia en el mundo.

Requerimientos ambientales con los que debe cumplir para considerarse una planta de cero emisiones:

- ✓ Desulfurización mayor a 99%
- ✓ Emisiones de NO_x menor a 0.077 g/kWh (0.05 lb/MBtu)
- ✓ Emisiones de partículas PM menor a 0.008 g/kWh (0.005 lb/MBtu)
- ✓ Remoción de mercurio Hg mayor a 90%

La iniciativa se encuentra en desarrollo de tecnología adecuada para cumplir con los objetivos que se plantearon como meta del proyecto, por lo que se comentarán el estado de algunos componentes que son relacionados con el tema de este trabajo.

4.2.2 Turbinas a hidrógeno

En las operaciones tempranas del FutureGen, la tecnología de generación avanzada de la gasificación por soplado de oxígeno será integrada con una turbina de gas alimentada de combustible hidrógeno para producir energía eléctrica. Las turbinas de la clase F[®] (incluyen un compresor axial de 18 etapas y una turbina de 3 etapas, es un desarrollo de General Electric) funcionan actualmente con eficacia en sistemas integrados de gasificación basada en carbón para obtener gas de síntesis con contenido de hidrógeno entre 25 por ciento y 38 por ciento (Wabash River y Tampa Electric, respectivamente). Turbinas similares han funcionado con gas de síntesis con contenido de hidrógeno de hasta 60 por ciento. El contenido más alto de hidrógeno puede ayudar a reducir las emisiones de NO_x en el proceso de la combustión ampliando el límite de la combustión magra de la premezcla.

El programa actual de la turbina está determinando los efectos y las ventajas del contenido del hidrógeno en combustibles mientras que la meta de las emisiones cero se persigue. La prueba limitada a corto plazo ha indicado que casi 100 por ciento de combustible de hidrógeno se puede encender en turbinas de clase F. Sin embargo, hay situaciones significativas que serán tratadas en el programa de investigación de la turbina. Éstas incluyen la fragilidad del material al utilizar hidrógeno, el retroceso de la flama de la premezcla, la degradación del material de la sección caliente debida al incremento de la transferencia de calor, y el control eficaz del NO_x. Encender 100 por ciento de hidrógeno puede causar reducciones drásticas en los tiempos de vida de servicio de los componentes de las turbinas; bajar la temperatura para compensar puede causar disminuciones substanciales de la eficiencia. La investigación en esta área se centra en acciones que mejoren la eficiencia del mantenimiento. Las técnicas de separación de oxígeno de un costo más bajo se desarrollan, la investigación sobre las turbinas a hidrógeno también se centrará en nuevos descubrimientos para la integración de la gasificación, la separación de los componentes del aire, y en sistemas de las turbinas.

4.2.3 Desarrollo de materiales

La investigación se centra en el desarrollo de materiales para su uso en componentes para sistemas de alta eficiencia basados en carbón que funcionarán en ambientes hostiles, y en altas temperaturas. Estos componentes incluyen los materiales del tubo de la caldera para el ciclo de vapor, la laminación para las turbinas de gas de alta temperatura, y los tamices de membrana y moleculares para la separación del gas.

Mejorar la eficiencia de las centrales eléctricas avanzadas aumentando la temperatura y la presión del fluido de trabajo (vapor) en el ciclo, un componente dominante del FutureGen, puede alcanzarse económicamente con el desarrollo de aceros férricos y austeníticos altamente resistentes al flujo para servicio en temperaturas hasta de 760° C. En aplicaciones de la turbina de gas, las súper aleaciones base-níquel tienen características excepcionales mecánicas y de oxidación a temperaturas elevadas, pero sus temperaturas de servicio son intrínsecamente limitadas alrededor 1000° C. Para aumentar la eficiencia termodinámica del ciclo y para alcanzar el funcionamiento del FutureGen y los objetivos

económicos, se están desarrollando materiales fuertes, resistentes a la oxidación para los álabes de las turbinas, capaces de funcionar a temperaturas más arriba de 1000° C. El programa de materiales también está apoyando el desarrollo de tamices moleculares K-25, para la separación del hidrógeno, que han exhibido un gran potencial para el funcionamiento de la planta FutureGen debido a su resistencia inherente al ataque del azufre.

La investigación también se enfoca en el desarrollo de la instrumentación, los sensores, y los controles que son críticos para la operación de la generación avanzada de energía basada en carbón y en las tecnologías confiables, económicas para la producción de hidrógeno. Una perspectiva emocionante es el desarrollo de sensores y diagnósticos para plantas “inteligentes” que reducen al mínimo el uso de componentes redundantes, mejoran la confiabilidad y la disponibilidad, y reducen los costos. El diseño “inteligente” requiere la supervisión de la condición de componentes críticos para anticipar fallas antes de que ocurran y se tomen las acciones preventivas. Los sensores bajo desarrollo deben tener la capacidad de funcionar confiablemente en ambientes severos, así como los algoritmos avanzados de la adquisición de datos y de la computadora, esenciales para realizar este avance.

Para que las técnicas y prácticas para secuestrar bióxido de carbono sean exitosas deben alcanzar los siguientes requerimientos:

- ✓ Que sean eficaces y con costos-competitivos
- ✓ Que provea de un almacenamiento estable a largo plazo y
- ✓ Que sea ambientalmente benigno

Usando la presente tecnología, se estima que los costos de secuestro están en el rango de US\$ 100 a US\$ 300 por tonelada de emisión de bióxido de carbono evitada. El objetivo a mediano plazo es reducir el costo del secuestro a US\$ 10 o menos por tonelada de emisión de bióxido de carbono evitada para 2015. Así mismo, se tiene planeado alcanzar en el 2010 eficiencias de electricidad / combustible entre 45 y 50% con un costo de capital de US\$ 1,000 / kW o menores para plantas con gasificación de carbón y secuestro de bióxido de carbono [2].

4.3 Sistema Eléctrico Distribuido

La Generación Distribuida (GD) representa un cambio en el paradigma de la generación de energía eléctrica centralizada. Aunque se pudiera pensar que es un concepto nuevo, la realidad es que tiene su origen, de alguna forma, en los inicios mismos de la generación eléctrica.

De hecho, la industria eléctrica se fundamentó en la generación en el sitio del consumo. Después, como parte del crecimiento demográfico y de la demanda de bienes y servicios, evolucionó hacia el esquema de Generación Centralizada, precisamente porque la central eléctrica se encontraba en el centro geométrico del consumo, mientras que los consumidores crecían a su alrededor. Sin embargo, se tenían restricciones tecnológicas de los generadores eléctricos de corriente continua y su transporte máximo por la baja tensión, que era de 30 a 57 kilómetros.

Con el tiempo, la generación eléctrica se estructuró como se conoce hoy en día, es decir, con corriente alterna y transformadores, lo que permite llevar la energía eléctrica prácticamente a cualquier punto alejado del centro de generación. Bajo este escenario, se perdió el concepto de

Generación Centralizada, ya que las grandes centrales se encuentran en lugares distantes de las zonas de consumo, pero cerca del suministro del combustible y el agua.

En los años setentas, factores energéticos (crisis petrolera), ecológicos (cambio climático) y de demanda eléctrica (alta tasa de crecimiento) a nivel mundial, plantearon la necesidad de alternativas tecnológicas para asegurar, por un lado, el suministro oportuno y de calidad de la energía eléctrica y, por el otro, el ahorro y el uso eficiente de los recursos naturales.

Una de estas alternativas tecnológicas es generar la energía eléctrica lo más cerca posible al lugar de consumo, precisamente como se hacía en los albores de la industria eléctrica, incorporando ahora las ventajas de la tecnología moderna y el respaldo eléctrico de la red del sistema eléctrico, para compensar cualquier requerimiento adicional de compra o venta de energía eléctrica. A esta modalidad de generación eléctrica se le conoce como Generación In-Situ, Generación Dispersa, o más cotidianamente, Generación Distribuida.

4.3.1 Definición de Generación Eléctrica Distribuida

Aunque no existe una definición como tal, diversos autores han tratado de explicar el concepto. A continuación se presentan las más ilustrativas:

- ✓ Generación en pequeña escala instalada cerca del lugar de consumo.
- ✓ Producción de electricidad con instalaciones que son suficientemente pequeñas en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico.
- ✓ Es la generación conectada directamente en las redes de distribución.
- ✓ Es la generación de energía eléctrica mediante instalaciones mucho más pequeñas que las centrales convencionales y situadas en las proximidades de las cargas.
- ✓ Es la producción de electricidad a través de instalaciones de potencia reducida, comúnmente por debajo de 1,000 kW.
- ✓ Son sistemas de generación eléctrica o de almacenamiento, que están situados dentro o cerca de los centros de carga.
- ✓ Es la producción de electricidad por generadores colocados, o bien en el sistema eléctrico de la empresa, en el sitio del cliente, o en lugares aislados fuera del alcance de la red de distribución.
- ✓ Es la generación de energía eléctrica a pequeña escala cercana a la carga, mediante el empleo de tecnologías eficientes, destacando a la cogeneración, con la cual se maximiza el uso de los combustibles utilizados.

Podemos decir entonces que la GD es: *la generación o el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de carga, con la opción de interactuar (comprar o vender) con la red eléctrica y, en algunos casos, considerando la máxima eficiencia energética [3].*

4.3.2 Tecnologías de generación distribuida.

El éxito de la difusión y fomento de la GD radica en la existencia de tecnologías de punta que permite, para potencias pequeñas, generar energía eléctrica en forma eficiente, confiable y de calidad.

Estas tecnologías se pueden dividir en las de generación y las de almacenamiento (figura 4.2).

Las tecnologías de generación se dividen, a su vez, en convencionales y no convencionales. Las primeras incluyen a las turbinas de gas, motores de combustión interna y microturbinas. Las segundas se refieren a las energías renovables, como la minihidráulica, geotérmica y biomasa, las turbinas eólicas, celdas de combustibles y celdas fotovoltaicas.

Las tecnologías de almacenamiento comprenden a las baterías de acumuladores, los volantes de inercia, las bobinas superconductoras, imanes y almacenamiento a base de hidrógeno.



Figura 4.2. *Tecnologías de Generación Distribuida*

Enseguida se analizará una combinación de tecnologías de GD con almacenamiento de hidrógeno y generación de electricidad con motores de combustión interna.

4.3.3 Generación distribuida con almacenamiento de hidrógeno y generación de electricidad con motores de combustión interna.

Las empresas que hacen uso intenso de la energía necesitan administrarla óptimamente para ser competitivas. Se tiene como objetivo minimizar su costo. En el caso de la energía eléctrica existen varias alternativas, por ejemplo: haciendo un uso eficiente y disminuyendo pérdidas, o tomando acciones que reduzcan la facturación, tales como la corrección del factor de potencia, o la administración de la demanda. Dentro de las estrategias para reducir la facturación, y particularmente hablando de las que intentan reducir la demanda y el consumo en horario punta, existen dos ampliamente usadas: una es la generación eléctrica mediante un equipo propio o “*peak shaving*”, y otra es el corrimiento de carga fuera de horario punta o “*load shifting*”. En las siguientes secciones se discutirá sobre el “*peak shaving*” o rasurado del pico con hidrógeno y motores de combustión interna para la región Noreste NE y para la tarifa horaria para servicio general en media tensión, con demanda de 100 kW o más HM-NE en México.

4.3.3.1 Costo unitario agregado

Una gran cantidad de usuarios industriales de CFE tiene tarifa horaria, en la cual la energía eléctrica posee costo diferenciado dependiendo de la hora en la que se consume. La energía que se utiliza en horario base, durante la madrugada, es más barata que la que se consume en horario punta, al iniciar la noche. El costo de las tarifas horarias depende también de la región en que se encuentre el usuario y de la época del año. A continuación, la Figura 4.3 y la Figura 4.4 muestran la distribución de horarios correspondientes a la tarifa HM en la región Noreste en el período de verano e invierno, respectivamente [4]:

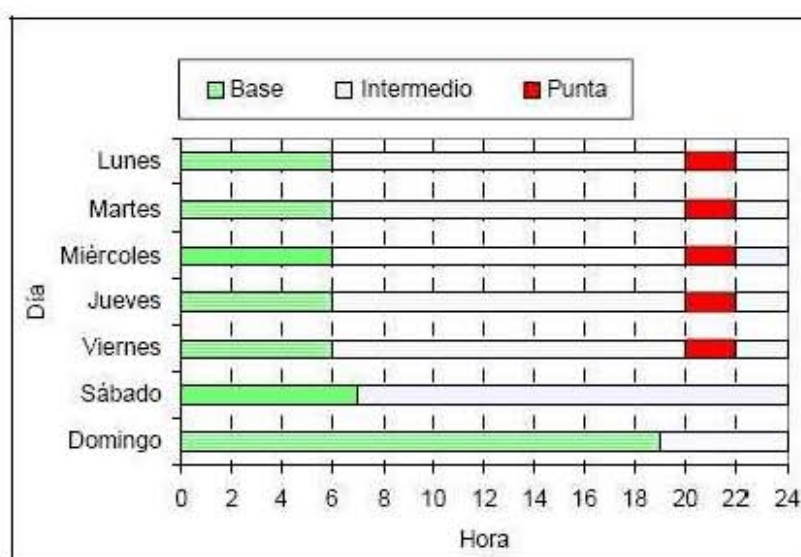


Figura 4.3 Periodo de Verano, del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre.

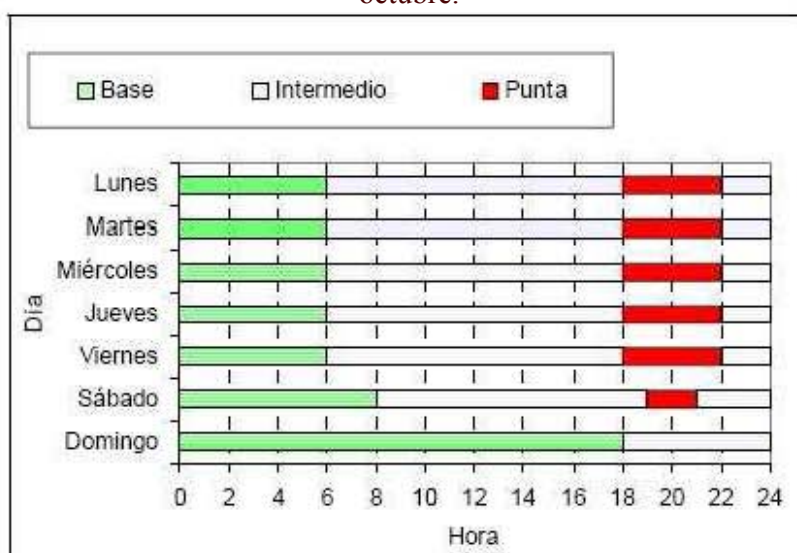
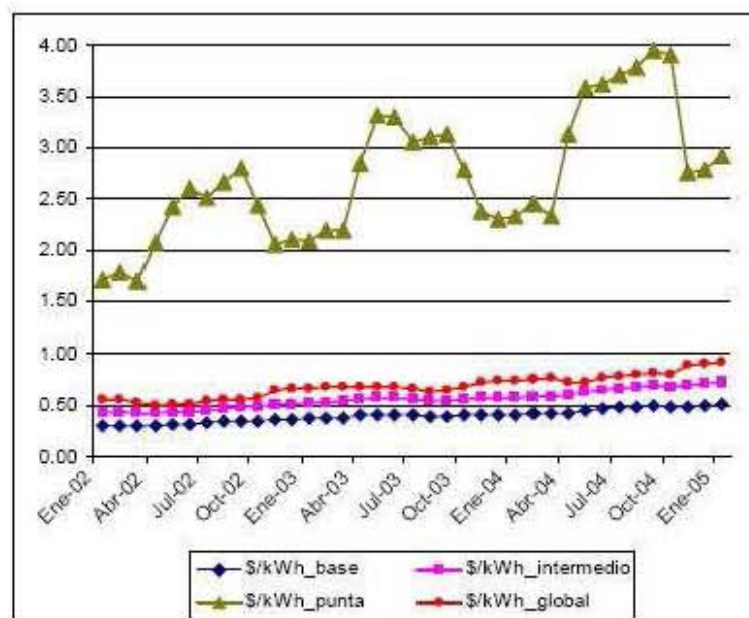


Figura 4.4 Periodo de Invierno: del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril.

Es posible calcular los costos unitarios de cada horario. Para ello se define costo unitario agregado como el importe en pesos que se paga por cada kWh consumido en el horario en cuestión, considerando los conceptos tanto de energía como de demanda.



Gráfica 4.1 Costo unitario agregado global y por horario

La Gráfica 4.1 muestra la evolución del costo unitario agregado para un usuario en la tarifa HM-NE con las siguientes suposiciones: la demanda máxima de horario intermedio es la mayor de las tres, seguida por la demanda máxima en horario punta; sin embargo la diferencia entre ellas es marginal.

Como se puede observar en la Gráfica 4.1, durante los meses de verano el costo unitario agregado de horario punta llega a ser, en promedio, 7.7 veces el costo unitario agregado de horario base y 5.6 veces el costo unitario agregado de horario intermedio[5]. Esta magnitud de diferencia en el precio de la energía es la que justifica los esfuerzos por reducir el consumo de energía en horario punta, lo cual redundaría en beneficios económicos. Por lo que se analiza, en términos de energía, si almacenar energía en forma de hidrógeno en horario base y luego utilizarla para generar electricidad con un motor de combustión interna accionado con hidrógeno (HICE por sus siglas en inglés: hydrogen internal combustion engine) en horario punta, da una relación menor al costo unitario agregado de horario punta en relación con el horario base.

4.3.3.2 Análisis del almacenamiento de energía con hidrógeno y generación de electricidad con motores de combustión interna.

Una de las ventajas de un sistema de almacenamiento de energía con hidrógeno es su capacidad de tomar electricidad y de almacenarla como hidrógeno, incluyendo electricidad fuera de horario punta y barata o electricidad de fuentes intermitentes de energía renovable tales como el viento y la solar, para un despliegue posterior como energía de alto-valor. La conversión del hidrógeno en electricidad se puede utilizar como energía eléctrica de respaldo o reserva, energía suplemental, para

afeitado del consumo en horario punta o como energía eléctrica primaria si se está alejado de la red de suministro eléctrico. Un módulo de energía con esta característica se integra con:

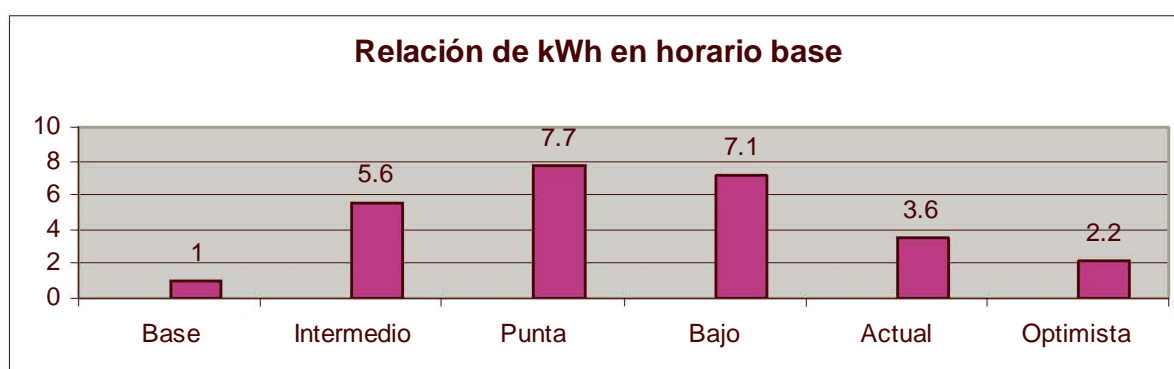
- ✓ Un electrolizador. El cuál descompone la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno.
- ✓ El compresor. El cuál comprime el hidrógeno para almacenarlo a alta presión.
- ✓ El HICE. El cuál convierte el hidrógeno en energía mecánica rotatoria.
- ✓ Un generador eléctrico que convierte la energía mecánica rotatoria en electricidad.
- ✓ Un tablero de transferencia que selecciona la fuente de electricidad, la red o el módulo.

Se propone analizar tres escenarios, con diferentes eficiencias para cada uno de los elementos de un módulo de almacenamiento de energía con hidrógeno y generación de electricidad con motores de combustión interna, para conocer si su eficiencia en conjunto arroja una relación competente entre los kWh necesarios para generar 1 kWh producto del almacenamiento de hidrógeno, el escenario 1 o bajo considera las eficiencias menores reportadas y calculadas, el escenario 2 o actual considera las eficiencias típicas con las que trabajan los equipos actualmente, el escenario 3 u optimista considera las eficiencias que se tiene previsto alcanzarán los componentes en un mediano plazo, estos escenarios se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Escenarios de la eficiencia global de un módulo de energía con almacenamiento de H₂.

Escenario	Electrolizador	Compresor	HICE	Generador	η_{global}
1. Bajo	47 % ^[6]	90 %	37 % ^[7]	90 % ^[8]	14 %
2. Actual	63 % ^[9]	95 % ^[10]	50 % ^[11]	95 % ^[8]	28 %
3. Optimista	85 % ^[12]	98 % ^[12]	56 % ^[13]	99 % ^[8]	46 %

La eficiencia global del módulo de energía con almacenamiento de H₂ se debe interpretar como la energía eléctrica en kWh en horario base, necesaria para almacenar en forma de hidrógeno y después convertir en un HICE y obtener un kWh en horario punta, es decir, que por cada kWh generado en horario punta se consumieron “n” kWh en horario base. Se muestra esta relación en la Gráfica 4.2



Gráfica 4.2 Relación de electricidad en horario base y horario punta para varios escenarios.

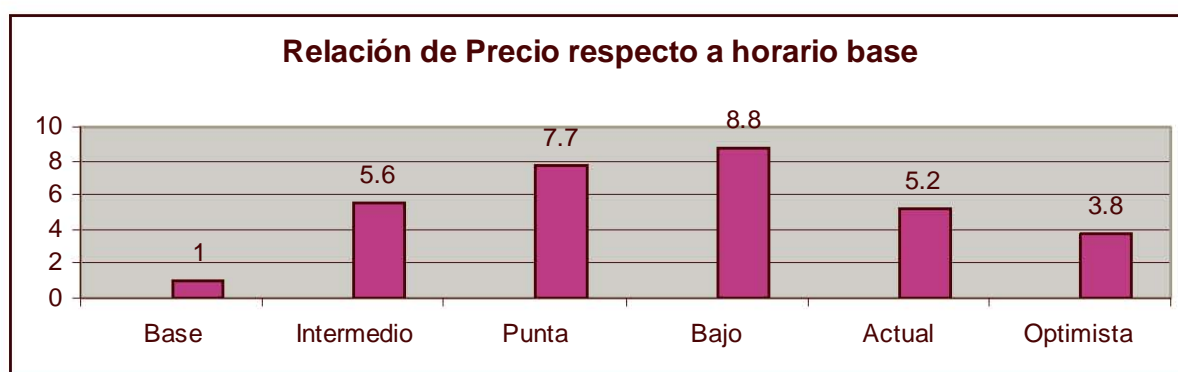
En la gráfica 4.2 se muestra en términos de energía la eficiencia global de un módulo de almacenamiento, se observa que en términos de energía, aún el escenario bajo presenta una ventaja con respecto al horario punta, no así, para el horario intermedio. Sin embargo, se observa que el escenario actual presenta en términos de energía un saldo positivo, tanto con respecto al horario

intermedio como para el horario punta, pero aquí sólo se refleja el consumo eléctrico del módulo de energía, hay que considerar además, el costo del módulo e integrarlo al precio por kWh generado por el módulo para así evaluar si resulta competitivo este concepto de ahorro de energía en términos económicos.

El costo del módulo se integró con información del DOE haciendo las siguientes consideraciones:

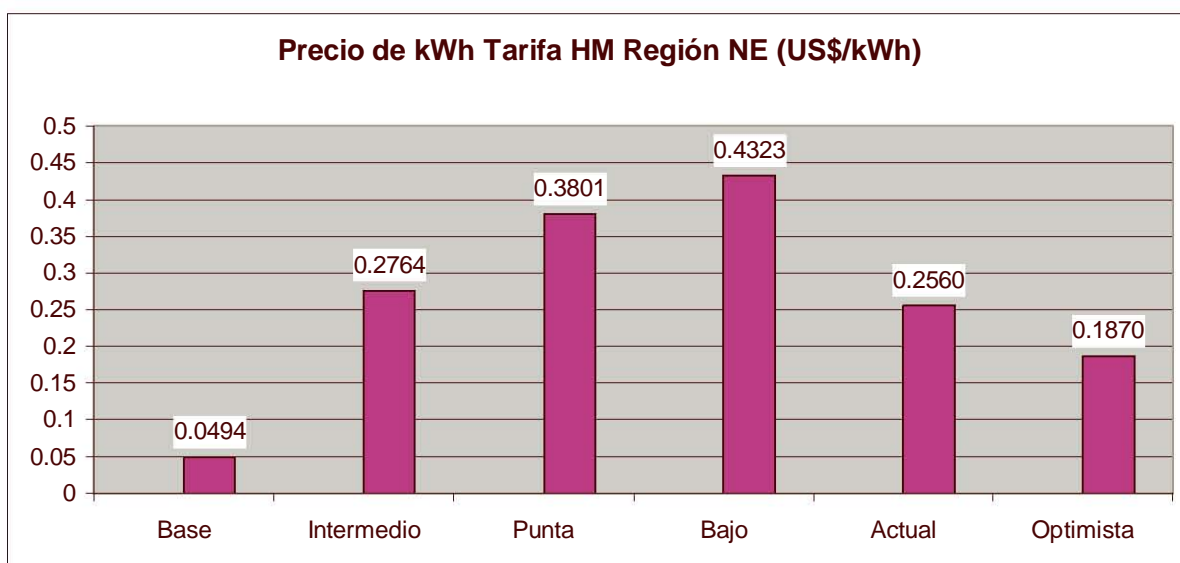
- ✓ Un costo inicial de US\$ 600 / kW
- ✓ Una vida útil de 40,000 hr
- ✓ Un costo de mantenimiento igual al 3% del costo de operación.
- ✓ Un costo de conversión del motor a HICE igual al 10% del costo inicial
- ✓ Un costo del electrolizador compresor con datos de [4] y [6].
- ✓ Una tarifa de \$ 0.543 pesos por kWh para Abril de 2006 en horario base HM-NE
- ✓ Un precio del dólar de \$11 pesos

Obteniéndose así que la relación de precio con respecto al horario base sólo es competitiva a partir del escenario actual como se observa en la gráfica 4.3



Gráfica 4.3 Relación de precio por kWh respecto a horario base para varios escenarios.

De hecho, los escenarios propuestos dan los siguientes resultados: en el escenario bajo el kWh resulta 56% más caro que en el horario intermedio y 14% más costoso que en el horario punta. Por su parte el escenario actual ofrece un ahorro del 7% con respecto al costo unitario agregado de horario intermedio y en relación al costo unitario agregado de horario punta brinda un ahorro del 33%. El escenario optimista muestra que de alcanzarse las eficiencias que arriba se consideraron se podrían obtener ahorros del 32% en comparación con el costo unitario agregado de horario intermedio y de 51% con respecto al costo unitario agregado de horario punta. Como se observa en la gráfica 4.4



Gráfica 4.4 Precio por kWh para varios escenarios.

Cabe mencionar que la tecnología para implementar los escenarios bajo y actual se encuentra disponible, por su parte el escenario optimista estará disponible en un mediano plazo, si el empeño que se pone en el desarrollo de estas tecnologías brinda los logros esperados y si se motiva su utilización con normas o leyes que restrinjan los niveles de emisiones de los módulos de energía que utilizan hidrocarburos. Así los consumidores individuales y las organizaciones grandes pueden generar su propia energía a base de hidrógeno, en dondequiera que haya electricidad y agua. El hidrógeno se puede utilizar en una variedad de usos y aplicaciones incluyendo la fabricación de productos industriales, el combustible para los vehículos, y la energía para los edificios y los hogares. El hidrógeno es un portador de energía excelente que puede resolver eficientemente muchas necesidades.

4.3.4 Estaciones de generación de Energía Eléctrica con Hidrógeno

En la siguiente sección se mencionan algunas estaciones de generación de electricidad que utilizan un HICE para impulsar el generador eléctrico y que representan un producto que ofrecen algunas compañías y que ya se encuentra disponible en el mercado, aunque en éste trabajo no se documento algún caso que brindara su experiencia con está tecnología. En la Tabla 4.2 se muestra un resumen de estos productos:

Tabla 4.2 Estado del Arte de Estaciones de generación de Energía Eléctrica con Hidrógeno

Referencia	Tipo de Motor	Potencia Original	Potencia con Hidrógeno	Potencia Eléctrica	Principal Aportación
[14]	1 cilindro	n / e	7 kW	n / e 8.75 kVA	Generador de combustión más pequeño del Mercado
[15]	n / e	n / e	55 kW	n / e 68.75 kVA	Proyecto demostrativo en Utsira, Noruega
[16]	HEC Ford 4.98 l 6 cilindros en línea	n / e	60 kW	n / e 75 kVA	Se combinan 4 para obtener 250 kW o múltiples
[17]	Ecostar Ford Tritón V10 6.8 l 2 válvulas	231 kW @ 4250 rpm 576 Nm @ 3250 rpm	n / e 91.2 kW	114 kVA	Generador de combustión más limpio del Mercado
[18]	Cummins/Onan Model GGKB 8.3 l 6 cilindros en línea	125 kW	125 kW	156.25 kVA	Trabaja con Hytane, sin pérdidas con respecto a GN
[19]	Stuart Energy Ford Tritón V10 6.8 l 3 válvulas	n / e 265 kW @ 4750 rpm 617 Nm @ 3250 rpm	125 kW	n / e 156.25 kVA	Disponible solo o con una unidad integral de Energía

(n / e) No especificado por el fabricante, pero calculado con un factor de potencia = 0.8

En la Tabla 4.2 se muestra un resumen de la información que se obtiene en Internet cuando se busca generadores de energía alimentados con hidrógeno (hydrogen genset) y a continuación se comenta de modo más amplio algunas de sus principales características.

Generador de 7 kW

Este generador fue adaptado de un generador a gasolina, de hecho, es apto para trabajar también con gasolina en caso de que se acabe el hidrógeno. La eficiencia de combustible es baja alrededor del 22% (según el fabricante) lo que se traduce en un consumo de combustible alto de 11.4 m³ de hidrógeno por hora. La presión de suministro de hidrógeno es de poco menos de un bar (10 kPa). Los gases que emite además de vapor de agua son NOx (< 1 g/kWh) y trazas de combustible quemado, con un costo adicional se puede incluir un convertidor catalítico que disminuya estas emisiones, las que de entrada son ya bajas.



Figura 4.5 *Generador Eléctrico de 7 kW alimentado con H₂O gasolina.*

Generador de 55 kW

Este generador forma parte del Sistema de Viento – Hidrógeno de Utsira, Noruega. Utsira es una isla de Noruega que cuenta con suficiente viento como para ser autosuficiente en términos energéticos. El proyecto en estudio hasta el 2006 utiliza el generador de 55 kW en conjunto con una celda de combustible de 10 kW, de los que no se proporcionan mayores datos, para generar electricidad para 10 hogares cuando las condiciones del viento son desfavorables. Este proyecto está financiado por varias compañías Noruegas.

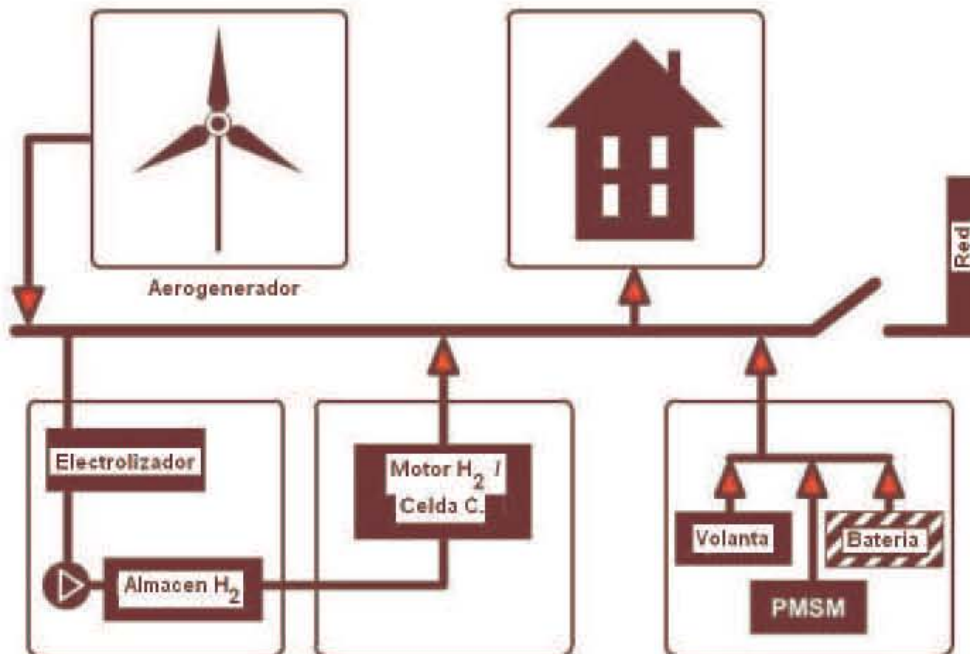


Figura 4.6 Diagrama del proyecto eólico-hidrógeno en Ustira, Noruega.

Generador de 60 kW

El Centro de Motores a Hidrógeno HEC (Hydrogen Engine Center) ofrece un generador eléctrico de respaldo cuya fuente de poder es un motor Ford remanufacturado y al que le han sido modificados: el cigüeñal, la compresión y el tamaño del cilindro para que utilice hidrógeno. Se garantizan 1,000 horas de operación o 3 años, lo que ocurra primero; además, se asegura que cumple con la regulación de la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) de Estados Unidos emitida en Enero del 2004 e incluso cumple con las disposiciones del Protocolo de Kyoto. Sin embargo, hay que mencionar que este motor alimentado con gasolina da un salida de 93 kW³ en su versión original.

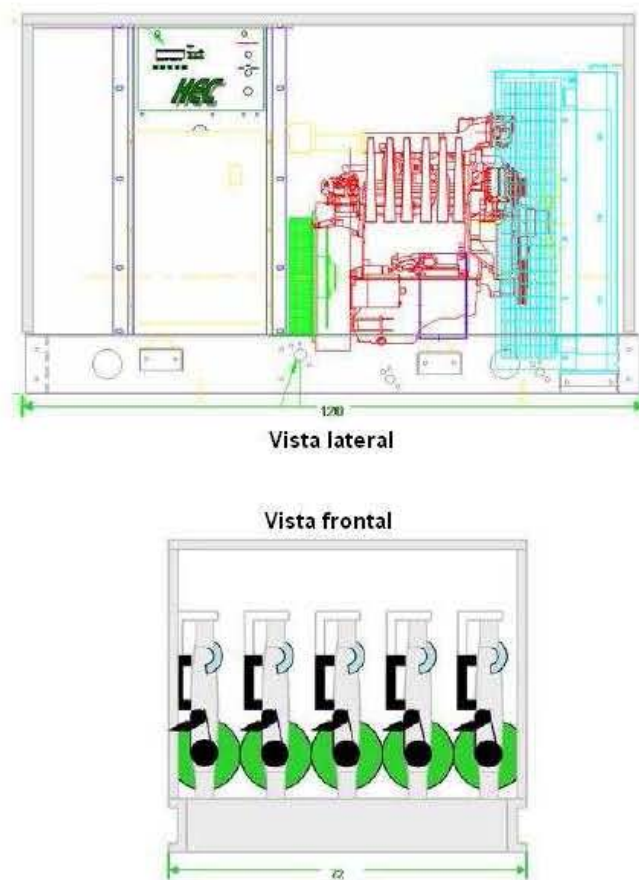


Figura 4.7 Módulo de 250 kW con 5 unidades de 60 kW del HEC

Generador de 91.2 kW

Este generador de energía eléctrica Ecostar™ fue anunciado en agosto del 2002 y es un producto desarrollado por Sistemas de Potencia Ballard junto con Productos de Potencia Ford y se esperaba que fuera el generador de energía eléctrica con las menores emisiones del mercado, el motor empleado para mover el generador, según la información anunciada es de Ford y en su versión de gasolina da una potencia máxima de 231 kW



Figura 4.8 Módulo Ecostar de 91.2 kW

Generador de 125 kW alimentado con Hythane

Este motor-generator es el mismo que ofrece la empresa Cummins/Onan en su modelo GGKB con una relación de compresión de 8.3 l, 6 cilindros en línea, que ha sido adaptado por la compañía Hydrogen Components, Inc. Para que funcione con Hythane, una mezcla de 80% de metano y 20% de hidrógeno, que como se menciona en la sección 2.7.5, es una mezcla óptima que permite tener la misma potencia del motor, pero con una reducción del 50% en la emisión de NOx.

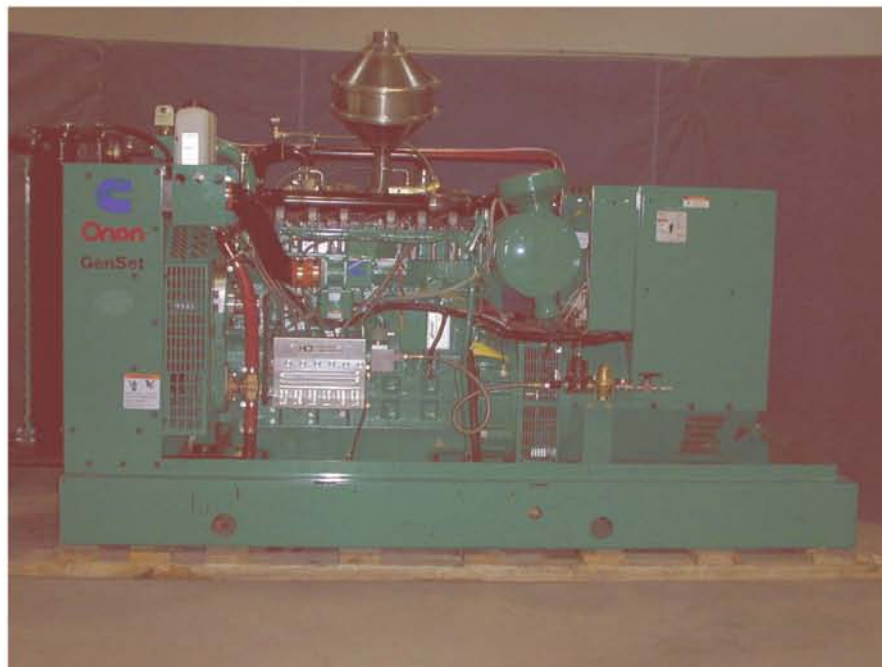


Figura 4.9 Generador de 125 kW alimentado con Hythane.

Generador de 125 kW

El módulo de energía de Stuart Energy Systems SES se diseñó para un encendido rápido que proporcione energía de reserva crítica en caso de una interrupción de la energía de la red. Pasa desde el modo de espera hasta la operación a carga completa en menos de 15 segundos.

El módulo de energía puede ser escalable y generar algunos kilovatios de electricidad hasta un megavatio. Un módulo típico de energía se basa en un HICE turbo-cargado acoplado a un generador eléctrico.

Un módulo de energía de SES se ofrece con HICE que convierte el hidrógeno en electricidad para energía de respaldo o reserva, energía suplemental, afeitado del pico o para energía primaria si se está alejado de la red de suministro eléctrico.

El motor de combustión interna tiene las siguientes características:

- ✓ Motor Ford Tritón 6.8 L modificado para funcionar con hidrógeno
- ✓ Funciona a 3.000 rpm
- ✓ Trabaja con un cociente “magro” de combustible-aire para eliminar virtualmente la emisión de NOx

El generador eléctrico tiene las siguientes características:

- ✓ Estándar 125 kilovatios de energía (salidas más altas disponibles)
- ✓ Disponible en 50 y 60 hertzios, en una amplia gama de voltajes



Figura 4.10 *Modulo de energía de 125 kW de Stuart Energy.*

4.4 Conclusiones

De los diversos casos de estudio presentados aquí, respecto a las adaptaciones hechas a motores realizadas a ellos para su operación con hidrógeno, se pueden concluir algunas observaciones realizadas al análisis de cada uno de los casos, como sigue:

- Es necesaria una política que reemplace a la actual cuyo principal objetivo es el menor costo; por otra que proponga una adecuada relación entre costo y menores emisiones contaminantes y que incluya el costo de las externalidades de la generación con hidrocarburos.
- La producción de energía eléctrica debe ser consumida al instante para mayor eficiencia de conversión porque almacenarla para utilizarla después supone una disminución en la eficiencia de conversión.
- La tecnología del hidrógeno se debe incorporar como otra opción para la diversificación de las fuentes energéticas.
- Los motores a gasolina considerando su relación de compresión no son aplicables por la pérdida de potencia, por lo que se requiere una relación de compresión mayor en el motor, que de hecho entra en el rango de los motores diesel.
- En motores diesel convencionales se debe aumentar la relación de compresión a valores muy altos o agregar bujías para iniciar la combustión por ignición de chispa.
- La temperatura de los gases de escape es > 600 °C por lo que son sujetos a esquemas de cogeneración o tri-generación, lo que elevaría su eficiencia hasta valores de 70-80%
- Una de las ventajas de un sistema de almacenamiento de energía con hidrógeno es su capacidad de tomar electricidad y de almacenarla como hidrógeno, incluyendo electricidad fuera de horario punta y barata o electricidad de fuentes intermitentes de energía renovable tales como el viento y la solar, para un despliegue posterior como energía de alto-valor.
- Un sistema de almacenamiento de energía con hidrógeno favorece el mejor aprovechamiento del parque de generación de electricidad existente al suavizar la demanda de electricidad en horario punta.
- Aunque no se incluyó el almacenamiento de oxígeno O_2 , se debe tener en cuenta que es un producto de alto valor, que puede utilizarse para mejorar la combustión y disminuir las emisiones o para otros fines.

REFERENCIAS

- [1].- FutureGen, Integrated Hydrogen, Electric Power Production and Carbon Sequestration Research Initiative. United States Department of Energy, Office of Fossil Energy. March, 2004
- [2].- Gasification Technology Research and Development Programm. United States Department of Energy, Office of Fossil Energy. April, 2006
- [3].- Generación distribuida Energía de calidad. Comisión Nacional Para el Ahorro de Energía CONAE, México. www.conae.gob.mx
- [4].- <http://www.cfe.gob.mx/www2/ClientesCFE/otrosgiros/tarifas.htm?seccion=otros&tarifa=%>
- [5].- Modelo para estimar costos evitados por corrimiento de carga fuera de horario punta. Armando Llamas, Federico Viramontes, *et al.* Centro de Estudios de Energía, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey, RVP-AI/2005 – SIS-11 ponencia recomendada por el comité de sistemas de potencia del capítulo de potencia del IEEE sección México y presentada en la reunión de verano, Acapulco, Gro., del 10 al 16 de julio de 2005.
- [6].- Atlantic Hydrogen. Hydrogen-fueled vehicles. <http://www.atlantichydrogen.net/refueling.html>
- [7].- Hydrogen IC Engine Boosting Performance and NOx Study. Robert J. Natkin, Xiaoguo Tang *et al.* 2003 - 01-0631 University of California-Riverside.
- [8].- Donald G. Fink. H. Wayne Beaty. Manual de Ingeniería Eléctrica. Tomo I. Ed. Mc Graw-Hill. ed. 13a. 2001
- [9].- Stuart Energy Station pp 6. Stuart Energy. [ses_20040413_web.pdf](http://www.stuartenergy.com/ses_20040413_web.pdf)
- [10].-Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies 2001. College of the Desert.
- [11].-Stockhausen, *et al.*, “Ford P2000 Hydrogen Engine Design and Vehicle Development Program”, SAE 2002-01-0240
- [12].- F. David Doty, PhD, A Realistic Look at Hydrogen Price Projections. Doty Scientific, Inc. Columbia, SC, Mar. 11, 2004 (updated Sept 21, 2004)
- [13].-Internal combustion engine report: spark ignited ICE genset optimization and A novel concept development. Jay Keller, Peter Van Blaringan. Proceedings of the 1998 U.S. DOE hydrogen program review. NREL/CP-570-25315
- [14].-Hydrogen / Gas Genset. <http://www.fuelcellstore.com/cgi-bin/fuelweb/view=Item/cat=/product=476>
- [15].-Utsira Wind-Hydrogen System, Ivar Hexeberg, 2005-03, Hydro. <https://www.hfpeurope.org/uploads/699/808/UTSIRA.pdf>
- [16].-<http://www.hydrogenenginecenter.com/HEC060-F49H-S01.pdf>
- [17].-<http://news.thomasnet.com/fullstory/16540/612>
http://en.wikipedia.org/wiki/Ford_Triton_engine#6.8
- [18].-<http://www.hydrogencomponents.com/genset.html>
- [19].-http://www.fuelcellmarkets.com/article_default_view.fcm?articleid=3852&subsite=1716 y
<http://www.fordenespanol.com/trucks/superduty/features/specs/>
<http://www.enginecenter.com/ford/fr649.html>

Anexo

Factor de planta. La relación entre la energía eléctrica producida por un generador o conjunto de generadores, durante un intervalo de tiempo determinado, y la energía que habría sido producida si este generador o conjunto de generadores hubiese funcionado durante el mismo intervalo a su potencia máxima posible. Se expresa en porcentaje.

REFERENCIAS

Capítulo I

- [1].- IPCC 2001 Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001. Climate Change 2001: The scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report: Cambridge University Press.
- [2].- Lovelock, J.E. 1988. The Ages of Gaia. New York: W.W.Norton and Co.
- [3].- Schlesinger, W.H. 1997. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. New York: National Academic Press.
- [4].- Silver, C.S. y R.S. DeFries. 1990. One Earth, One Future. Washington, D.C.: National Academic Press.
- [5].- Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero asociadas al consumo de energía 1998.
- [6].- IV Informe de Labores CFE 2003-2004.
- [7].- Informe de Labores 2001. CFE.
- [8].- Cambio Climático: una visión desde México. Julia Martínez y Adrian Fernández Bremauntz (compiladores). SEMARNAT, INE. Noviembre 2004.
- [9].- Cuadro C2 Evolución de los precios de los combustibles. Anexo C Costos Futuros de la Energía. Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2004-2013. CFE.
- [10].- Table 8c. US Regional Natural Gas Prices: Base Case. Energy Information Administration. Official Energy Statistics from de US Government.
- [11].- Antonio Gershenson. Energéticos: los tiempos y los engaños. Sección Política, La Jornada Domingo 22 de enero de 2006.
- [12].- Noé Cruz Serrano, et al. Finanzas página 1, El Universal, Jueves 09 de marzo de 2006.
- [13].- Robert h. Perry, Don W. Green, James O. Maloney. Manual del Ingeniero Químico. McGraw Hill, 1992.
- [14].- Hydrogen Vehicles by Musashi Institute of Technology "MUSASHI" series 1974-1997 <http://www.herc.musashi-tech.ac.jp>
- [15].- Folkecenter for Renewable Energy: <http://www.folkecenter.dk/>
- [16].- Ovonic Hydrogen Systems LLC: <http://www.ovonic-hydrogen.com/>
- [17].- BMW Clean Energy: <http://www.bmw.com/generic/com/en/fascination/technology/cleanenergy/>
- [18].- Ovonic: <http://www.ovonic-hydrogen.com/>
- [19].- <http://www.newscom.com/cgi-bin/prnh/20040920/NYM197>
- [20].- <http://www.h2-developpement.fr>
- [21].- <http://www.hydrogen.ru/print.php?sid=91%20>
- [22].- Quantum: www.qttw.com/products/oem/hybrid/h2hybrid.php
- [23].- Mazda: <http://www.mazda.com/publicity/release/200510/1005be.html>
- [24].- F-250 Super Chief tri-fuel truck.
- [25].- Japan's Corporate News Network.
- [26].- Rose JW, Cooper JR. Technical Data on Fuels. Edinburgh, UK: Scottish Academic Press, 1977.

Capítulo II

- [1].- Máquinas Térmicas Motoras, Jesús Andrés Álvarez Flóres Ed. AlfaOmega ed 1ª. 2005.
- [2].- Termodinámica, Yunus A. Cengel. Ed Mc Graw Hill ed 4a. 2002
- [3].- John L. Lumley. Engines An Introduction. Ed. Cambridge University Press, ed 1ª 1999.
- [4].- C.F. Taylor, *The Internal Combustion Engine In Theory and Practice*, Volumen 1. M.I.T. Press, Cambridge, MA, 1966.
- [5].- J.B. Heywood. Internal Combustión Engine Fundamentals McGraw, 1988
- [6].- Hydrogen IC Engine Boosting Performance and NOx Study. Robert J. Natkin, Xiaoguo Tang et al. 2003 - 01-0631 University of California-Riverside
- [7].- The Effects of Change in Compression Ratio on Hydrogen Fueled Ford Modular V8", M. Swain, M. Swain, Report to Stuart Energy, January 2000.
- [8].- A hydrogen system with solenoid valves for a four-cylinder hydrogen-fuelled engine. L.S. Guo, H.B. Lu, et al. International Journal of Hydrogen Energy 24 (1999) 377-382.
- [9].- Lean Mixture Operation of Hydrogen- Fueled Spark Ignition Engines. James S. Wallace, et al. SAE Technical Paper Series 852119.
- [10].-Modifications to a Hydrogen / Electric Hybrid Bus Y. Baghzouz, J. Fiene, J. Van Dam et al. American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA-2000-2857 pp 363-370.
- [11].-Dissociated methanol engine testing results using H₂-CO mixtures. Eric Anthonissen, James S. Wallace. Reprinted from 18TH Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, August 21-26, 1983. No. 839091
- [12].-Ethanol vehicle cold start improvement when using a H₂ suplmented E85 Fuel. Gregory W. Davis, Edward T. Heil, Ray Rust. American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA-2000-2849 pp 303-308
- [13].-The Daimler-Benz Hydride Vehicle Project H. Buchner and R. Povel Int. J. Hydro-gen Energy Vol. 7, No.3, pp 259-266, 1982
- [14].-Peter Prechtl, Frank Dorer, et al. Energy conversion in a hydrogen fueled diesel engine: optimization of the mixture formation and combustion. Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers, 433-432, 1999
- [15].-Internal combustion engine report: spark ignited ICE genset optimization and A novel concept development. Jay Keller, Peter Van Blaringan. Proceedings of the 1998 U.S. DOE hydrogen program review. NREL/CP-570-25315
- [16].-Hydrogen combustion under Diesel engine conditions. J.D. Naber and D.I. Siebers IJHE 23 (1998) 363-371
- [17].-Performance Characteristics of Hydrogen-Fueled Diesel Engine with Ignition Assist. A.B. Welch, J.S. Wallace. SAE Technical Paper No. 902070, 1990
- [18].-Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine. M. Senthil Kumar, A. Ramesh, B. Nagalingam. International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) 1143 – 1154
- [19].- Use of Hydrogen in Dual Fuel Engines G. Gopal, P. Srinivasa Rao, K.V. Gopalakrishnan and B.S. Murthy Int. J. Hydrogen Energy Vol. 7, No.3, pp 267-272, 1982
- [20].- Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications. S.O. Bade Shrestha and G.A. Karim. The University of Calgary, Dept. of Mechanical Engineering Paper 97478 pp 910-915.
- [21].-Hydrogen/CNG Blended Fuels Performance Testing in a Ford F-150. Don Karner James Francfort. U.S. DOE FreedomCAR & Vehicle Technologies Program Advanced Vehicle Testing Activity INEEL/EXT-03-01313

- [22].-Reduced turbine emissions using hydrogen-enriched fuel. R.W. Schefer. Proceedings of the 2002 U.S. DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-610-32405
- [23].-Investigation of a gas turbine combustion system fired with mixtures of natural gas and hydrogen. H.J. Tomczak, G Benelli, et al. IFRF Combustion Journal Article No. 200207, 2002

Capítulo III

- [1].- Rose JW, Cooper JR. Technical Data on Fuels. Edinburgh, UK: Scottish Academic Press, 1977
- [2].- Erren RA, Campell WH. Hydrogen a Comercial fuel for internal combustion engines and other purposes. J. Inst. Fuel 1933; 6:277-90.
- [3].- Al Alousi Y. Examination of the combustion processes and performance of a spark ignition engine using a data acquisition system. PhD thesis, University of Calgary, Mechanical Engineering, November 1982.
- [4].- Bade Shrestha, Karim GA, Wierzba I. Examination of operational limits in gas fueled spark ignition engines. SAE paper No. 2000-01-1944.-SP-1549
- [5].- Li H, Karim GA. Experimental and predictive performance of a S.I. engine, para ser publicado
- [6].- Das LM. Exhaust emission characterization of hydrogen operated engine system. Int. J. Hydrogen Energy 1990; 15:833.
- [7].- Shioji M, Inoue N. Performance and NOx formation in a hydrogen premixed –charge engine. Proceedings of 12th World Hydrogen Conference, Buenos Aires, Argentina, 1998. p.1469-78.
- [8].- Shioji M, Islayama T. Feasibility of the high speed hydrogen engine. International Symposium on Hydrogen Energy. Osaka, Japan, January 2002 p.1-9.
- [9].- Karim GA, Wierzba I, Al-Alousi Y. Methane –hydrogen mixtures as fuel. Int. Hydrogen Energy 1996;21:625-34.
- [10].- Sierens R, Rosseel E. Backfire mechanism in a carburetted hydrogen fuelled compression ignicion engine. Proceedins of the 12 World Hydrogen Conference, Buenos Aires, Argentina, 1998. p.341-53.
- [11].- Karim GA, Klat SR. The knock and autoignition characteristics of some gaseous fuels and their mixtures. J. Inst. Fuel 1966;39:109-19
- [12].- Hord J. Is hydrogen a safe fuel. Int. J. Hydrogen Energy 1978;3:157-76
- [13].- Norbeck JM et al. Hydrogen fuel for surface transportation. Warrendale, Mich., USA: SAE, 1996.
- [14].- Hydrogen IC Engine Boosting Performance and NOx Study. Robert J. Natkin, Xiaoguo Tang et al. 2003 - 01-0631 University of California-Riverside.
- [15].- Jesús Andrés Álvarez Flórez, Callejón I., Máquinas Térmicas Motoras, Ed. Alfaomega, ed.1ª.2005
- [16].- Stockhausen, et al, “Ford P2000 Hydrogen Engine Design and Vehicle Development Program”, SAE 2002-01-0240.
- [17].- Fuel Injectors, Fuel Metering. QUANTUM Technologies. www.impcotechnologies.com
- [18].- III.0 Hydrogen Storage Sub-Program Overview, FY 2004 Progress Report, DOE Hydrogen Program.
- [19].- Atlantic Hydrogen - Hydrogen-fueled vehicles. <http://www.atlantichydrogen.net>
- [20].- Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies 2001. College of the Desert.

Capítulo IV

- [1].- FutureGen, Integrated Hydrogen, Electric Power Production and Carbon Sequestration Research Initiative. United States Department of Energy, Office of Fossil Energy. March, 2004
- [2].- Gasification Technology Research and Development Programm. United States Department of Energy, Office of Fossil Energy. April, 2006
- [3].- Generación distribuida Energía de calidad. Comisión Nacional Para el Ahorro de Energía CONAE, México. www.conae.gob.mx
- [4].- <http://www.cfe.gob.mx/www2/ClientesCFE/otrosgiros/tarifas.htm?seccion=otros&tarifa=%>
- [5].- Modelo para estimar costos evitados por corrimiento de carga fuera de horario punta. Armando Llamas, Federico Viramontes, *et al.* Centro de Estudios de Energía, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey, RVP-AI/2005 – SIS-11 ponencia recomendada por el comité de sistemas de potencia del capítulo de potencia del IEEE sección México y presentada en la reunión de verano, Acapulco, Gro., del 10 al 16 de julio de 2005.
- [6].- Atlantic Hydrogen. Hydrogen-fueled vehicles. <http://www.atlantichydrogen.net/refueling.html>
- [7].- Hydrogen IC Engine Boosting Performance and NOx Study. Robert J. Natkin, Xiaoguo Tang et al. 2003 - 01-0631 University of California-Riverside.
- [8].- Donald G. Fink. H. Wayne Beaty. Manual de Ingeniería Eléctrica. Tomo I. Ed. Mc Graw-Hill. ed. 13a. 2001
- [9].- Stuart Energy Station pp 6. Stuart Energy. [ses_20040413_web.pdf](http://www.stuartenergy.com/ses_20040413_web.pdf)
- [10].- Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies 2001. College of the Desert.
- [11].- Stockhausen, *et al.*, “Ford P2000 Hydrogen Engine Design and Vehicle Development Program”, SAE 2002-01-0240
- [12].- F. David Doty, PhD, A Realistic Look at Hydrogen Price Projections. Doty Scientific, Inc. Columbia, SC, Mar. 11, 2004 (updated Sept 21, 2004)
- [13].- Internal combustion engine report: spark ignited ICE genset optimization and A novel concept development. Jay Keller, Peter Van Blaringan. Proceedings of the 1998 U.S. DOE hydrogen program review. NREL/CP-570-25315
- [14].- Hydrogen / Gas Genset. <http://www.fuelcellstore.com/cgi-bin/fuelweb/view=Item/cat=/product=476>
- [15].- Utsira Wind-Hydrogen System, Ivar Hexeberg, 2005-03, Hydro. <https://www.hfpeurope.org/uploads/699/808/UTSIRA.pdf>
- [16].- <http://www.hydrogenenginecenter.com/HEC060-F49H-S01.pdf>
- [17].- <http://news.thomasnet.com/fullstory/16540/612>
http://en.wikipedia.org/wiki/Ford_Triton_engine#6.8
- [18].- <http://www.hydrogencomponents.com/genset.html>
- [19].- http://www.fuelcellmarkets.com/article_default_view.fcm?articleid=3852&subsitem=1716
y <http://www.fordenespanol.com/trucks/superduty/features/specs/>
<http://www.enginecenter.com/ford/fr649.html>