



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LAS
ADAPTACIONES EN MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA PARA UTILIZAR MEZCLAS GAS-HIDRÓGENO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – SOLAR FOTOVOLTAICA

P R E S E N T A:

Mauricio Alberto Escalante Soberanis

TUTOR:

Dr. Arturo Fernández Madrigal

2008





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. López de Haro Mariano

Secretario: Dr. Fernández Madrigal Arturo

Vocal: Dr. Cervantes de Gortari Jaime

1^{er}. Suplente: Dr. García Valladares Octavio

2^{do}. Suplente: M. I. Sánchez Dirzo Rafael

Lugar donde se realizó la tesis:

Centro de Investigación en Energía

TUTOR DE TESIS:

Dr. Arturo Fernández Madrigal

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme permitido realizar mis estudios de maestría en el campus Morelos. A las autoridades del Centro de Investigación en Energía, por el apoyo académico y administrativo recibido durante estos últimos dos años.

Al doctor Arturo Fernández Madrigal, director de este trabajo de investigación, por su apoyo constante durante los procesos de aprendizaje, revisión, análisis y redacción, y por haberme permitido colaborar con él en el desarrollo de la actividad científica.

Al comité tutorial:

Dr. Jaime Cervantes de Gortari,

Dr. Mariano López de Haro,

Dr. Octavio García Valladares,

M. I. Rafael Sánchez Dirzo.

Su apoyo, sugerencias y valiosos consejos fueron fundamentales para la redacción del presente trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca recibida para realizar mis estudios de maestría.

ÍNDICE

Contenido	I
Resumen	V
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	6
1.2.1 Métodos de producción de hidrógeno	7
1.2.2 Propiedades del hidrógeno	8
1.2.3 Formas de almacenamiento	11
1.2.4 El hidrógeno como combustible	12
1.3 Justificación	13
1.4 Conclusiones	14
1.5 Referencias	15
2. Inyección de hidrógeno	19
2.1 Sistemas de inyección	19
2.2 Motores de ignición por compresión	20
2.2.1 Tipos de inyección	20
2.2.2 Inyectores	22
2.3 Motores de ignición por chispa	23
2.3.1 Tipos de inyección	25
2.3.2 Inyección de carga estratificada	26
2.4 Revisión sobre inyectores	27
2.4.1 Inyectores convencionales	27
2.4.2 Inyectores de hidrógeno	28
2.5 Situación en el mercado	33
2.6 Conclusiones	35
2.7 Referencias	37

3. Sistema de enfriamiento	39
3.1 Generalidades sobre enfriamiento de motores	39
3.1.1 Enfriamiento por líquido	40
3.1.2 Enfriamiento por aire	41
3.1.3 Enfriamiento de motores de ignición por compresión	43
3.1.4 Enfriamiento de motores de ignición por chispa	44
3.2 Aplicación de las ecuaciones de transferencia de calor	45
3.3 Enfriamiento en los motores de hidrógeno	46
3.3.1 Pérdidas por enfriamiento	47
3.3.2 Reducción de las pérdidas por enfriamiento	49
3.3.3 Hidrógeno líquido como combustible	50
3.4 Un método para controlar la temperatura del cilindro	50
3.4.1 Solución de la ecuación de transferencia de calor	52
3.4.2 Resultados	53
3.5 Conclusiones	57
3.6 Referencias	59
4. Mezclas de gas/hidrógeno	61
4.1 Termodinámica química	61
4.1.1 Entalpías de formación y valores caloríficos	61
4.2 Química cinética de las reacciones de combustión	63
4.2.1 Velocidades de reacción	63
4.2.2 Reacciones en cadena	63
4.3 Combustión de mezclas de hidrocarburos	64
4.3.1 Composición del aire	64
4.3.2 Combustión estequiométrica	65
4.3.3 Emisiones y oxidación de hidrocarburos	67
4.4 Combustión de mezclas gas/hidrógeno	69
4.4.1 Reacción de combustión	69
4.4.2 Fenómenos de combustión anormal	70
4.5 Revisión de motores alimentados con hidrógeno	71
4.5.1 Hidrógeno y gas natural	72
4.5.2 Hidrógeno y diesel	77

4.5.3	Hidrógeno y aire	79
4.6	Conclusiones	82
4.7	Referencias	84
5.	Discusión y análisis de factibilidad	87
5.1	Introducción	87
5.2	Discusión y análisis	89
5.3	Referencias	92
6.	Conclusiones	93

RESUMEN

Las consecuencias ambientales, a nivel mundial, por el uso desmedido de los combustibles fósiles en los medios de transporte son ya evidentes en nuestros días y el agotamiento de dichos recursos son inminentes en nuestro país. El hidrógeno es el elemento más abundante de nuestro planeta y puede ser usado como combustible en motores de combustión interna. Sin embargo, no es una fuente de energía y no se encuentra de manera directa en la naturaleza, pero es un vector energético capaz de almacenar energía para ser usada en diversas formas, con cierto valor energético.

En el presente trabajo se muestra un panorama sobre los avances y las adaptaciones realizadas en la actualidad en las máquinas de combustión interna, para el uso del hidrogeno como combustible. Esto a través de la revisión bibliográfica y el análisis de factibilidad. Asimismo, con este trabajo, se sentaron las bases para poder iniciar un proyecto de investigación sobre los aspectos más relevantes de las adaptaciones y que se puedan llevarse a cabo en forma experimental.

En el primer capítulo se ha dedicado a describir algunas características de la situación actual en cuanto al consumo de hidrocarburos, y de la investigación, el mercado y los avances en el uso del hidrógeno.

El segundo capítulo está enfocado a un aspecto importante para las adaptaciones de los motores de combustión interna, los sistemas de inyección. En él se establecieron las condiciones necesarias para que el hidrógeno pueda fluir en los inyectores y los distintos conductos del combustible en el motor, sin afectar de manera negativa el funcionamiento de los mismos, causado por las propiedades altamente corrosivas del hidrógeno.

El tercer capítulo trata sobre algunas técnicas empleadas para reducir el sobrecalentamiento del motor, producto de las altas temperaturas de flama del hidrógeno, la tendencia a la autoignición, al retroceso de flama y la alta difusión del hidrógeno.

El cuarto capítulo se centra en los avances sobre la investigación en mezclas gas/hidrógeno. Inicia con teoría de la combustión y proporciona algunas ecuaciones

importantes que involucran las reacciones de combustión del hidrógeno, con base en la termodinámica química y la química cinética.

Finalmente se proporcionan las conclusiones del trabajo, junto con algunas recomendaciones, resultado del análisis de factibilidad. A continuación se presentan los objetivos del trabajo, así como las metas y metodología.

Objetivo

Estudiar y reportar la factibilidad técnica de las adaptaciones en motores de combustión interna que utilizan mezclas de gas-hidrógeno.

Objetivos específicos

- Revisar y analizar el uso de inyectores para motores de combustión interna (chispa y compresión) que utilicen mezclas de gas-hidrógeno.
- Revisar y analizar el comportamiento de las diversas mezclas gas-hidrógeno durante la combustión.
- Revisar y analizar los diversos materiales para el enfriamiento de los motores cuando operan con una mezcla gas-hidrógeno.

Metas Previstas

- Establecer las mejores condiciones técnicas de operación con los inyectores más adecuados que utilicen una mezcla gas-hidrógeno.
- Establecer las mejores composiciones de mezclas gas-hidrógeno para su empleo en motores de combustión interna.
- Establecer las condiciones de enfriamiento en motores de combustión interna con mezclas gas-hidrógeno.

- Determinar las mejores condiciones de operación para reducirlos gases contaminantes en motores de combustión interna que operen con mezclas de gas-hidrógeno.

Metodología

La metodología para la realización del trabajo de investigación consiste en realizar una revisión bibliográfica que abarque los tres puntos mencionados anteriormente (inyectores, mezclas y enfriamiento), pero aplicados a las mezclas de gas-hidrógeno.

En cuanto a esta revisión se buscará abarcar la mayor cantidad de información posible, publicada durante los últimos años, con el objetivo de reportar lo último que se ha hecho en este rubro. Los recursos utilizados para esto serán revistas científicas internacionales que abarquen el tema de los vectores y fuentes de energía, específicamente el hidrógeno, y reportes de investigaciones en la rama de la energía del hidrógeno.

Posteriormente se realizará el análisis de la información para determinar las características que mejor se aplican a una adaptación de hidrógeno en una máquina de combustión interna, así como reportar los avances más significativos y el rumbo dominante que ha tomado la investigación en hidrógeno para su empleo como combustible en motores de combustión interna.

Finalmente, el reporte del trabajo de investigación contendrá una síntesis de todo lo aprendido durante la realización de la revisión bibliográfica y el análisis de la información adquirida durante el estudio.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Resumen

En este capítulo se dan a conocer las motivaciones del presente trabajo, en lo que respecta a la problemática ambiental y a la económica, y se mencionan algunos trabajos previos.

Se presentan algunas cifras sobre los gases de efecto invernadero y la contribución de las emisiones de los motores de combustión interna a la cantidad de dichos gases presentes en la atmósfera. Igualmente se reportan unas estimaciones sobre la disponibilidad del petróleo en México, en cuanto a reservas probadas se refiere.

Algunas propiedades que hacen al hidrógeno capaz de alimentar un motor de combustión interna son mencionadas en este capítulo, además de las ventajas y desventajas que presenta su uso como combustible. Es por esto que se presentan también algunos de los avances logrados en la investigación científica sobre mezclas de hidrógeno para la combustión.

La conversión de los motores que usan hidrocarburos como combustibles, para funcionar con hidrógeno, es una práctica que se lleva a cabo por unas pocas empresas de países como Estados Unidos, por ejemplo, las cuales se mencionan en el desarrollo de este capítulo. Además, existen ya empresas automotrices que fabrican automóviles que corren con hidrógeno como combustible, sin estar aún al alcance del público en general.

1.1 Antecedentes

El uso del hidrógeno como combustible de un motor se ha puesto a prueba sobre bases muy limitadas con varios grados de éxito por numerosos investigadores durante muchas décadas, y mucha información sobre sus hallazgos se encuentra en la literatura [Karim, 2003; Lee y Kim, 2006; Kabat y Heffel, 2002]. Sin embargo, existen reportes del desempeño que no

necesariamente son consistentes entre varios investigadores. También existe la tendencia de enfocarse en resultados obtenidos en motores específicos bajo condiciones de operación muy especializadas. Más aún, el creciente énfasis en la naturaleza de las emisiones y consideraciones de eficiencia representan, en general, gran parte del trabajo [Karim, 2003].

Se necesita tomar en cuenta lo que se ha logrado en este campo, mientras se enfoca tanto en los rasgos atractivos como en las limitaciones potenciales y las desventajas asociadas que se necesitan superar para que el hidrógeno se vuelva un combustible ampliamente aceptable para aplicaciones de motores. También se necesita indicar los pasos prácticos para operar y diseñar medidas que sean desarrolladas e incorporadas al hidrógeno para lograr todo su potencial como un combustible con muchas ventajas sobre los hidrocarburos y comercialmente atractivo [Karim, 2003].

White y colaboradores [White et al., 2006] realizaron una revisión técnica de los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno, haciendo énfasis en las mezclas de carga ligera y media con las que se ha trabajado, para evitar los fenómenos originados por una mala combustión. En este trabajo también se reportaron estudios sobre las emisiones de NO_x y el desempeño del motor, cuando se varía la concentración de la mezcla aire/hidrógeno.

Se están realizando diversos tipos de investigaciones en universidades de distintas partes del mundo para desarrollar motores que funcionan con hidrógeno y de esta manera lograr altas eficiencia y potencia. En la universidad japonesa de Sungkyunkwan se desarrolló una máquina que puede lograr tales características a través de un sistema de inyección dual de mezcla aire/hidrógeno, combinando la inyección directa al cilindro con un inyector de alta presión y la inyección de mezcla externa con un inyector de entrada de baja presión [Lee y Kim, 2006].

En un trabajo de investigación hecho por la Ford Motor Company, en colaboración con la Universidad de Riverside, en California, se probaron cinco tipos de inyectores electrónicos de pulso modulado con diferentes recubrimientos en su interior y reportaron los que tuvieron la mayor durabilidad y el mejor desempeño, usando hidrógeno puro como gas a inyectar [Kabat y Heffel, 2002].

En cuanto al enfriamiento de los motores, Shudo ha realizado trabajos en los que se dedica principalmente a estudiar las pérdidas por enfriamiento, para así aportar soluciones y poder disminuir las altas temperaturas del motor, producidas por la combustión y la fricción, y así aumentar la eficiencia térmica. Esto se logra a través de la inyección de carga estratificada y el retardo en el tiempo de la chispa, que se verá con mayor detalle en los capítulos II y IV. Con los mismos propósitos ha estudiado la aplicabilidad de las ecuaciones de la transferencia de calor en la combustión del hidrógeno [Shudo y Suzuki, 2002; Shudo, 2007].

En materia de abastecimiento de hidrógeno, durante 2003 se habían reportado alrededor del mundo más de 70 estaciones de abastecimiento de hidrógeno, principalmente en Estados Unidos, Europa y Japón [Fuel Cells 2000, 2003]. Entre ellas se encuentran tanto estaciones móviles como estacionarias, algunas con producción de hidrógeno comprimido, líquido o en mezcla con gas natural.

Asimismo, se han realizado estudios sobre las propiedades de la flama del hidrógeno y las mejores mezclas para lograr una buena combustión, como se hizo en un artículo publicado por Bunev [Bunev, 2007]. Por otro lado, Heffel [Heffel, 2003] ha trabajado en la recirculación de gases de escape en los motores de hidrógeno para mejorar el desempeño y disminuir las emisiones de NO_x en un motor de ignición por chispa.



Figura 1.1. Hydrogen7 [BMW, 2007].

En 2006 la empresa BMW introdujo al mercado el Hydrogen7, vehículo con motor de 12 cilindros, 260 caballos de fuerza y una torca de 390Nm (Figura 1.1). Funciona con gasolina e

hidrógeno y el conductor puede cambiar de un combustible a otro con sólo oprimir un botón, incluso con el motor en marcha, y sin ningún cambio en el desarrollo de la velocidad. Este automóvil es capaz de recorrer 650km: 200km con hidrógeno y 450km con gasolina. El tanque de hidrógeno puede contener 8kg de este combustible (aproximadamente 170 litros) en estado líquido a -250°C y está compuesto de un tanque interior y uno exterior, conectados por cintas de baja conducción térmica de material sintético reforzado con fibra de carbono, con un espacio vacío entre los dos tanques. El tanque interior está hecho de 40 capas de lámina de aluminio y el exterior de fibra de vidrio [BMW, 2007].

La empresa ETEC (Electric Transportation Engineering Corporation), con base en Phoenix, Arizona, Estados Unidos, se dedica a adaptar vehículos que funcionan originalmente con gasolina para que lo hagan con hidrógeno gaseoso. Los vehículos con los que hasta el momento ha realizado dichas adaptaciones esta empresa han sido camionetas del tipo “pick up”, de la marca Chevrolet Sierra y Chevrolet Silverado, como se muestra en la Figura 1.2. El hidrógeno con el que funcionan sus adaptaciones es inyectado electrónicamente y se encuentra en estado gaseoso, en 3 tanques de 150 litros, para cada vehículo. Estas camionetas tienen la capacidad de recorrer hasta 339km, en carretera, con hidrógeno como combustible, a una potencia de 195 caballos de fuerza y una torca de 352Nm, alcanzando velocidades de hasta 161km/hr, con un rendimiento de hasta 32.3km/kg [ETEC, 2007].



Figura 1.2. Camioneta Chevrolet Silverado con tanques de hidrógeno gaseoso [ETEC, 2007].

La empresa austriaca Hoerbiger, dedicada a la instrumentación y automatización automotriz, ha sacado al mercado sus inyectores de hidrógeno a alta presión con válvulas accionadas por solenoide para motores de combustión interna. También ha desarrollado válvulas de hidrógeno para aplicaciones en celdas de combustible [Hoerbiger, 2007].

En marzo de 2006, la empresa Mazda empezó a comercializar en Japón el RX-8 Hydrogen RE de motor rotativo (Figura 1.3), que puede usar tanto gasolina como hidrógeno. En 2004 sólo se vendió a compañías y entidades públicas japonesas [Mazda, 2004]. En Agosto de 2006, empezó a circular en Europa, específicamente en Noruega, donde se instaló la primera estación de suministro de hidrógeno, para este automóvil. Este automóvil cambia de alimentación con tan sólo oprimir un botón, al igual que con el Hydrogen 7, de la BMW, desarrolla aproximadamente 110 caballos de fuerza y un torque de 140Nm, corriendo con hidrógeno. Su tanque de hidrógeno gaseoso a alta presión, colocado en la cajuela, es de 110 litros y le da una autonomía de 100km, con este combustible. El sistema de inyección electrónico funciona con inyectores duales de hidrógeno gaseoso, que inyectan el combustible en cámaras separadas de entrada y combustión, evitando así el retroceso de flama.



Figura 1.3. Mazda RX-8 Hydrogen RE [Mazda, 2004].

En la Universidad del Estado de Pennsylvania, Estados Unidos (PENNSTATE), se encuentra el Laboratorio de Investigación de Vehículos Híbridos y de Hidrógeno (HHVRL, por sus siglas en inglés), en el cual se llevan a cabo proyectos para la conversión de distintos modelos de automóviles para correr con hidrógeno, entre otros. Dicho laboratorio fue creado dentro del

marco del Programa de Seguridad y Sistemas Vehiculares, del Instituto de Transporte de Pennsylvania (PTI). Entre sus proyectos sobre combustión de hidrógeno destacan la conversión de una camioneta Chevrolet Suburban y la instalación, en 2004, de una estación de suministro de hidrógeno, ubicada en un parque dentro del campus de la Universidad [PENNSTATE, 2007].

1.2 Planteamiento del problema

La contaminación del aire es evidente en nuestros días. Las emisiones de las máquinas de combustión interna que usan hidrocarburos han llegado a límites alarmantes desde hace ya varios años. La producción de electricidad y movimiento es necesaria para el desarrollo de cualquier sociedad, sin embargo, es la causa también de múltiples problemas ambientales, debido a los combustibles que requieren para su función, siendo éstos, básicamente, provenientes de fuentes fósiles o no renovables.

En el caso de la Unión Europea el consumo de energía proviene mayoritariamente de combustibles fósiles (41% del petróleo, 22% de gas natural y 16% de carbón), las centrales nucleares aportan un 15% y las fuentes renovables sólo el 6%. En 2003, el sector del transporte, que representaba entre un 6% y un 10% del Producto Interno Bruto, consumía un 40% de la energía y se previó el aumento de un 20% y un 30%, respectivamente, durante los siguientes veinte años. El consumo en Europa, en 2001, fue de 16 millones de barriles diarios, mientras que en Estados Unidos fue de 19 millones [Fundación Terra, 2003].

Los vehículos son una de las principales fuentes antropogénicas de emisión de contaminantes a la atmósfera en los grandes centros urbanos. El transporte terrestre es causa de problemas importantes de salud por la emisión de contaminantes al aire afectando el bienestar de la población y de daños al ambiente por la emisión de gases de efecto invernadero que produce el calentamiento global. Los motores diesel y de ignición por chispa, han demostrado ser la mayor fuente de contaminación en las ciudades [INE, 2007; Karim y Li, 2005].

Los contaminantes primarios que emiten los modernos motores de ignición por chispa son, principalmente, óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos que no llegan a ser quemados o lo son parcialmente (UHC), pequeñas cantidades de óxidos de azufre y otras partículas [Karim y Li, 2005]. La concentración de monóxido de carbono en el aire

representa el 75% de los contaminantes emitidos a la atmósfera. Aproximadamente el 70% de las emisiones de CO provienen de las fuentes móviles [SIMAT del DF, 2007]. En el año de 1998, en el Distrito Federal, las emisiones de CO por fuentes móviles eran de 800 mil toneladas al año [SEMARNAT, 2007].

En los últimos años, los precios del petróleo y demás hidrocarburos han ido en aumento. La disponibilidad de estos recursos en el mundo es limitada, aunque algunos países aún poseen reservas muy grandes, tales como Irak y Kuwait, cuyas reservas probadas se encuentran por encima de los 100 mil millones de barriles equivalentes de petróleo [British Petroleum, 2007], y pueden contar con este recurso, según su nivel de producción, por aproximadamente 100 años más. Este no es el caso de México, cuyas reservas de hidrocarburos (incluyendo crudo, líquidos del gas y gas seco) se encontraban, al 31 de Diciembre de 2007, en los 14.7 mil millones de barriles de crudo equivalente, de los cuales aproximadamente 10 mil millones corresponden al crudo. La producción promedio de crudo en México, en lo que va de 2008, es de 3.44 millones de barriles de crudo al día [PEMEX, 2008; World Oil, 2008]. Con estas cifras se puede calcular que la vida de las reservas probadas de crudo, en México, es de 8 años, aproximadamente.

1.2.1 Métodos de producción de hidrógeno

Existen varios métodos para producir el hidrógeno, que difieren tanto en costos como en tecnología. La producción industrial actual consiste en el reformado por vapor del metano, el cual es el principal constituyente del gas natural. Los productos de la reacción de reformado son hidrógeno molecular (H_2) y monóxido de carbono (CO). Para aumentar la eficiencia del proceso se añade vapor de agua al CO para producir más hidrógeno y dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, este último proceso aumenta los costos de la producción del hidrógeno, ya que se requiere de dos intercambiadores de calor.

El proceso de oxidación parcial catalítica moderadamente exotérmica es considerablemente más rápido que el reformado por vapor. Cuando el oxígeno y el metano pasan por un catalizador, ocurre la reacción de oxidación, de manera completa, incluso de los productos, dando lugar a reacciones sucesivas, tales como la formación de metano y el reformado en seco.

La conversión de energía eléctrica en hidrógeno y oxígeno por medio de la electrólisis del agua fue demostrada por Faraday en 1820 y usada formalmente desde 1890. Sin embargo, si la electricidad usada para dicha producción proviene de los combustibles fósiles, el costo del hidrógeno obtenido será mayor que el asociado con el reformado por vapor del gas natural.

Otra tecnología para producir hidrógeno consiste en la transformación de la biomasa a través del gas natural o de los aceites pesados, proceso conocido como gasificación. Los productos de dicho proceso consisten en 48% hidrógeno, 40% carbón y 10% vapor de agua. Sin embargo, la conversión de gas natural a carbón no es normalmente deseable y el vapor sólo se puede usar localmente, así que podemos hablar de una eficiencia del 48% del proceso.

La producción de hidrógeno por biomasa se puede llevar a cabo a través de la descomposición del agua o algún otro sustrato factible, debido a la fermentación biológica, bacterial o de algas. Dichos procesos se pueden dar en la oscuridad o con la presencia de luz.

Se han enfocado esfuerzos para que aquellos dispositivos destinados a producir electricidad a partir de la luz, tales como los fotovoltaicos y fotoelectroquímicos, puedan entregar hidrógeno en vez de la potencia eléctrica, a través de la fotodisociación. Esto se ha desarrollado con el propósito de comparar costos y eficiencias.

Otra ruta contemplada para la producción de hidrógeno es la descomposición térmica del agua. Debido a que se requieren temperaturas por arriba de los 3000K, inalcanzables con los materiales disponibles en la actualidad, se han hecho esfuerzos por lograr dicha descomposición a temperaturas de aproximadamente 800°C [Hoffmann, 2001; Sørensen, 2005].

1.2.2 Propiedades del hidrógeno

El hidrógeno posee ciertas propiedades únicas que le permiten ser usado como combustible. Sin embargo, existen otras tantas que se deben controlar para que en un motor de combustión interna se pueda tener un funcionamiento adecuado.

Se puede observar, según la Tabla 1.1, que el hidrógeno posee una energía mínima de ignición menor en un orden de magnitud comparado con el de los demás combustibles

registrados. La temperatura de autoignición del hidrógeno es mayor que en los demás combustibles, lo cual ayuda a prevenir este fenómeno de la combustión. El amplio rango de flamabilidad del hidrógeno permite introducir mezclas en la cámara de combustión a distintos porcentajes de combustible, desde cargas muy ligeras hasta cuatro veces la carga estequiométrica. El coeficiente de difusión de 0.61 se encuentra por encima del resto de dichos coeficientes, de lo cual se puede inferir que se puede tener una mezcla más uniforme y, en caso de fuga, evitar un accidente por explosión. En la Tabla 1.2 se muestran algunas de las ventajas y desventajas en el uso de hidrógeno como combustible.

Tabla 1.1. Propiedades de seguridad del hidrógeno y otros combustibles, a condiciones estequiométricas. No se reportan los datos marcados con líneas punteadas [Sørensen, 2005].

Propiedad	Hidrógeno	Metanol	Metano	Propano	Gasolina	Unidad
Mínima energía de ignición	0.02	----	0.29	0.25	0.24	mJ
Temperatura de flama	2045	----	1875	----	2200	°C
Temperatura de autoignición	585	385	540	510	230-500	°C
Máxima velocidad de flama	3.46	----	0.43	0.47	----	m/s
Rango de flamabilidad	4-75	7-36	5-15	2.5-9.3	1.0-7.6	Vol. %
Rango de explosividad	13-65	----	6.3-13.5	----	1.1-3.3	Vol. %
Coeficiente de difusión	0.61	0.16	0.20	0.10	0.05	10 ⁻³ m ² /s

Tabla 1.2. Ventajas y desventajas del uso del hidrógeno como combustible.

Ventajas	Desventajas
El hidrógeno puede ser producido por fuentes renovables.	Requiere de mayor volumen de almacenamiento que la gasolina.
Las únicas emisiones no deseadas de la combustión aire/hidrógeno son NOx.	La combustión de carga pesada produce golpeteo, preignición y retroceso de flama.
La combustión a carga ligera es muy estable.	Elevado costo de producción y almacenamiento en estado líquido

Alta temperatura de autoignición.	Desgaste más rápido de las partes de un motor, alta corrosión.
El rango de flamabilidad es más amplio que el de la gasolina.	
NO SE AGOTA	

En la Figura 1.4 se puede observar una gráfica de presión contra temperatura, que muestra los límites de explosión de una mezcla hidrógeno/aire a condiciones estequiométricas. En ella se puede observar que a partir de la temperatura de autoignición reportada de la Tabla 1.1 se da la explosión bajo cualquier valor de presión. Se reportan en la gráfica tres distintos límites que se usan para poder regular las relaciones de compresión y las temperaturas en la cámara, y así controlar la explosión de la mezcla.

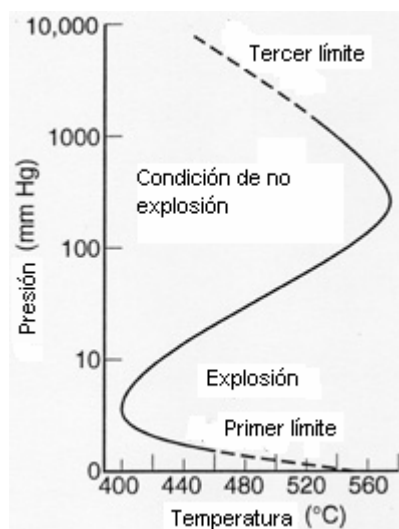


Figura 1.4. Límites de explosión de un sistema estequiométrico hidrógeno/oxígeno [Glassman, 1987].

Una propiedad importante del hidrógeno y por la cual destaca sobre otros combustibles es la densidad energética, pues es mayor que la de la gasolina, metano (gas natural) y etanol, entre otros. En la Tabla 1.3 se muestran las densidades energéticas del hidrógeno a diferentes condiciones, comparadas con otros combustibles. Se puede observar que en estado líquido se tiene una densidad energética mayor, por unidad de volumen. La desventaja que se presenta radica en el hecho de que en estado gaseoso el hidrógeno tiene una densidad másica muy baja, por lo que se requiere de un 30% de hidrógeno en una mezcla estequiométrica con aire, porcentaje muy alto en comparación con el 1% que presenta la gasolina.

Tabla 1.3. Densidad energética por peso y por volumen, y densidad de masa, para el hidrógeno en diferentes formas de almacenamiento, incluyendo gas natural, biocombustibles y gasolina, para comparación [Sørensen, 2005].

Almacenamiento	Densidad de energía		Densidad
	<i>kJ/kg</i>	<i>MJ/m³</i>	<i>kg/m³</i>
Hidrógeno gas a 0.1MPa	120000	10	0.09
Hidrógeno gas a 20MPa	120000	1900	15.90
Hidrógeno gas a 30 MPa	120000	2700	22.50
Hidrógeno líquido	120000	8700	71.90
Hidrógeno en hidruro metálico	2100	11450	5480
Gas natural a 0.1MPa	56000	37	0.67
Metanol	21000	17000	0.79
Etanol	28000	22000	0.79
Gasolina	45000	33000	737.22

1.2.3 Formas de almacenamiento

El almacenamiento de hidrógeno comprimido en estado gaseoso es uno de los métodos más comunes hoy en día. Existen cilindros de hidrógeno que lo contienen en un rango de presiones que van desde los 10 hasta los 20 MPa, y algunos autos de motor de celdas de combustible van desde los 25 hasta los 35 MPa. Se han hecho pruebas para almacenar hidrógeno gaseoso a 70MPa y así poder obtener rangos aceptables en carros de pasajeros. El proceso de compresión se puede llevar a cabo en una estación de abasto, conduciendo el hidrógeno a través de ductos.

El almacenamiento de hidrógeno líquido requiere de refrigeración a una temperatura de 20K, y el proceso de licuefacción requiere un gasto energético industrial de al menos 15.1 MJ/kg e hidrógeno puro, tal y como en el proceso análogo para el nitrógeno o el helio. Un envase para almacenar el hidrógeno líquido consiste en muchas capas de metal separado por un material altamente aislante, con presiones cercanas a 0.01Pa y una conductividad térmica de alrededor de 0.05WK⁻¹.

Algunos metales pueden contener hidrógeno a densidades volumétricas de más del doble del hidrógeno líquido. Sin embargo, si la densidad es importante, se convierte en un método de dudosa efectividad en aplicaciones móviles, pero para usos estacionarios y descentralizados de

almacenamiento se vuelve interesante, debido a las mínimas pérdidas que se presentan a condiciones ambientales y las condiciones confiables de seguridad existentes en esta modalidad.

1.2.4 El hidrógeno como combustible

El hidrógeno ha sido reconocido ampliamente como un combustible que posee ciertas propiedades adecuadas para su aplicación en motores de combustión interna. Es el único que puede producirse a partir del agua, mediante el ciclo renovable que posee dicho compuesto. Su combustión en oxígeno produce únicamente agua, pero en aire produce óxidos de nitrógeno, los cuales pueden atraparse mediante catalizadores adecuados. Estos rasgos hacen del hidrógeno un excelente combustible para cumplir potencialmente con los controles ambientales cada vez más rigurosos para las emisiones de los dispositivos de combustión, incluyendo la reducción de la emisión de gases de efecto de invernadero. El hidrógeno como combustible renovable puede producirse a través de fuentes renovables y no renovables de energía, y reemplazar incrementalmente las fuentes en agotamiento de los combustibles fósiles convencionales. En consecuencia, la investigación en todos los aspectos de la tecnología del hidrógeno, especialmente en los años recientes, ha sido verdaderamente masiva y diversificada. Son necesarias, tanto una declaración concisa como una discusión de los rasgos positivos del hidrógeno como combustible y las limitantes asociadas que están impidiendo su amplia aplicación para motores de combustión interna [Karim, 2003; Lee y Kim, 2008].

La viabilidad del hidrógeno como combustible, en general, y en las aplicaciones de los motores, en particular, depende, en gran medida, de la solución efectiva, económica y satisfactoria de varios problemas clave, aún no resueltos, que limitan su desarrollo. Esas limitantes que dificultan su aplicación comercial como combustible para un motor son primeramente relacionadas con su producción, almacenamiento, seguridad, portabilidad, transporte y pureza, y pueden ser consideradas como críticas, más aún que aquellas que muestran las actuales y futuras aplicaciones de otros combustibles, incluyendo el gas natural [Karim, 2003; Karim y Li, 2006].

Las propiedades no lubricantes del hidrógeno, su baja energía de ignición y la alta presión de almacenamiento representan los principales problemas a resolver [Lee y Kim, 2008]. El hidrógeno produciría un desgaste muy rápido en la partes de un motor de combustión interna, es

por eso que se necesita realizar adaptaciones a las superficies de las partes que entran en contacto con este combustible.

1.3 Justificación

La ventaja de realizar un estudio de factibilidad técnica consiste en prever las necesidades de un laboratorio o un proyecto de investigación experimental que pretenda reportar resultados sobre el uso del hidrógeno en motores de combustión interna, a partir de investigaciones y estudios previos, que se hayan reportado en la literatura científica. Con este trabajo se pretende dar un punto de partida para el desarrollo de las tecnologías del hidrógeno, en cuanto a combustión se refiere, en un país en donde aún no se ha empezado a investigar al respecto, como es el caso de México. Para esto es necesario determinar las diversas condiciones a las que se han llegado en distintos laboratorios del mundo y las adaptaciones que han funcionado mejor.

Recientes investigaciones impulsan el desarrollo de motores avanzados de hidrógeno con una mejor potencia y emisiones reducidas de óxidos nitrosos a altas cargas del motor [Lee y Kim, 2008; White et al., 2006; Heffel, 2003]. En cuanto a los avances que se han logrado en la investigación sobre los motores de combustión interna que funcionan con hidrógeno como combustible, se destacan tres aspectos: Inyectores, Mezclas y Sistemas de enfriamiento.

Los inyectores actuales funcionan para suministrar combustibles convencionales a diferentes concentraciones del combustible y a diferentes temperaturas, por lo que resulta necesario realizar cambios en dichos dispositivos, para su funcionamiento con hidrógeno. Las mezclas con que deben trabajar los motores deben ser diferentes porque las características necesarias para una adecuada combustión, tales como la razón de compresión, temperatura de ignición, entre otras, son diferentes. El sistema de enfriamiento debe ser muy preciso debido a las temperaturas de combustión del hidrógeno.

La capacidad de las máquinas de combustión interna que funcionan con hidrógeno (HICE, por sus siglas en inglés) para operar con emisiones casi nulas se debe principalmente al efecto de dos características únicas para el hidrógeno [White et al., 2006]:

1. En principio, los óxidos nitrosos (NO_x) son las únicas emisiones no deseadas, formados por la disociación térmica y la oxidación del nitrógeno en el aire atmosférico durante la combustión.
2. El bajo límite de flamabilidad a carga ligera del hidrógeno permite una combustión estable bajo condiciones de alta dilución.

Las HICE ofrecen el potencial de utilizar infraestructura de manufactura ya desarrollada originalmente para máquinas de combustión interna alimentadas con derivados del petróleo y así realizar las adaptaciones necesarias [White et al., 2006]. Es en este aspecto en el que las HICE van delante de tecnologías como la de las celdas de combustible que, a pesar de ser probablemente la manera más limpia y eficiente de usar hidrógeno, la implementación de una producción de celdas de combustible de membrana intercambiadora de protones se encuentra a un mínimo de 10 años desde ahora [White et al., 2006; Heffel, 2003].

1.4 Conclusiones

El agotamiento de los recursos energéticos fósiles ya es evidente en México, ya que se cuenta con un máximo de 9 años de extracción de las reservas probadas de petróleo. Además, la creciente contaminación ambiental provocada por las fuentes móviles resulta de gran preocupación para el futuro inmediato. Es por esto que se presenta el hidrógeno como un vector energético que forma parte de una solución integral a los dos problemas mencionados.

Las propiedades del hidrógeno hacen que sea un combustible con gran factibilidad para ser usado en máquinas de combustión interna, por su alta densidad energética y una combustión libre de emisiones contaminantes como el monóxido de carbono, hidrocarburos sin quemar y dióxido de carbono. Además, tiene la ventaja de su disponibilidad ilimitada, mediante su recuperación y producción por distintos métodos.

Existen empresas extranjeras que ya comercializan automóviles con motores alimentados con hidrógeno, como la Mazda y la BMW. Sin embargo, el alto costo de la tecnología actual para la producción de dichos automóviles no permite que dichos productos estén al alcance del público en general. Es tarea de la investigación científica mejorar el rendimiento, la eficiencia y el costo de los motores de hidrógeno para que sean competitivos en el mercado.

Por otra parte, se requiere de una mayor infraestructura de almacenamiento y abastecimiento de hidrógeno que pueda responder a las necesidades de una producción en masa de estos automóviles. En este sentido se recomienda la investigación sobre tecnologías de producción de hidrógeno mediante fuentes renovables de energía y también sobre tecnologías de transporte y almacenamiento que tengan menores costos a los actuales e incrementen la seguridad en el manejo de este combustible.

1.5 Referencias

- Bunev, V. A. Role of atomic hydrogen diffusion in a hydrogen flame, *Combustion, Explosion and Shock Waves*. **43**, **2** (2007) 125-131.
- Fundación Terra. *Perspectiva Ambiental: Hidrógeno Solar*. 2003.
- Glassman, I. *Combustion* (2a ed., Academic Press, Orlando, 1987).
- Heffel, J. W. NO_x emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500rpm using exhaust gas recirculation. *International Journal of Hydrogen Energy* **28** (2003) 901-908.
- Hoffmann, P. *Tomorrow's energy: hydrogen, fuel cells and the prospects of a cleaner planet* (MIT Press, Cambridge, 2001).
- Kabat, D. M., Heffel, J. W. Durability implications of neat hydrogen under sonic flow conditions on pulse-width modulated injectors, *International Journal of Hydrogen Energy* **27** (2002) 1093-1102.
- Karim, G. A. Hydrogen as a spark ignition engine fuel, *International Journal of Hydrogen Energy* **28** (2003) 569-577.
- Karim, G. A., Li, H. Exhaust emissions from an SI engine operating on gaseous fuel mixtures containing hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy* **30** (2005) 1491-1499.

- Karim, G. A., Li, H. Hydrogen fueled spark-ignition engines predictive and experimental performance, Journal of engineering for gas turbines and power **128** (2006) 230-236.
- Lee, J. T., Kim, Y. Y. The development of a dual injection hydrogen fueled engine with high power and high efficiency, Journal of engineering for gas turbines and power **128** (2006) 203-212.
- Shudo, T. Improving thermal efficiency by reducing cooling losses in hydrogen combustion engines, International Journal of Hydrogen Energy **32** (2007) 4285-4293.
- Shudo, T., Suzuki H. Applicability of heat transfer equations to hydrogen combustion. JSAE Review **23** (2002) 303-308.
- Sørensen, B. Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications (Elsevier Academic Press, Amsterdam 2005).
- White, C. M., Steeper R. R., Lutz A. E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical Review, International Journal of Hydrogen Energy **31** (2006) 1292-1305.
- www.bp.com
- www.bmw.com
- www.etecevs.com
- www.fuelcells.org
- www.hoerbiger.com
- www.ine.gob.mx

- www.pemex.com.mx
- www.semarnat.gob.mx
- www.sma.df.gob.mx/simat/
- www.vss.psu.edu/hhvr1
- www.worldoil.com

CAPÍTULO II

INYECCIÓN DE HIDRÓGENO

Resumen

En este capítulo se presentan algunos de los avances que se han realizado en los sistemas de inyección para adaptarlos al uso del hidrógeno como combustible. Las propiedades altamente corrosivas del hidrógeno demandan el uso de materiales de bajo índice de fricción que funcionen como recubrimientos lubricantes de las distintas partes del motor, siendo éstas principalmente las que están en contacto directo con el combustible.

En primer lugar se dan a conocer los principios de funcionamiento del sistema de inyección convencional, con sus distintas maneras de inyectar el combustible, ya sea por el lugar o por el tiempo de la inyección. Esto se hace con el propósito de establecer un panorama sobre lo que se puede aprovechar de la tecnología existente para aplicarlo a los motores de hidrógeno.

También se presentan algunos de los avances en materia de adaptaciones de los sistemas de inyección para alimentar con mezclas gas/hidrógeno. Se hace especial énfasis en los nuevos inyectores que se han desarrollado y en las boquillas de los mismos. Una combustión completa y controlada depende en gran medida de la calidad de estos dispositivos y es ahí donde radica la importancia del estudio de los mismos.

2.1 Sistemas de inyección

El propósito original de la inyección de combustible fue obtener la máxima potencia de un motor. La pérdida de presión en un carburador deteriora la eficiencia volumétrica del motor y reduce la salida de potencia. Además, el problema de tener una distribución pareja de combustible, mediante el balance de varios carburadores, se puede eliminar mediante la inyección de combustible. Los primeros sistemas de inyección de combustible fueron mecánicos,

y las complejas levas de dos dimensiones han sido reemplazadas por sistemas electrónicos [Stone, 1999].

2.2 Motores de ignición por compresión

La inyección de combustible en el cilindro del motor al tiempo adecuado dentro del ciclo es un componente necesario para la operación de un motor de ignición por compresión (IC) debido a que el sistema de inyección es el encargado de iniciar y controlar el proceso de combustión.

Los objetivos del sistema de inyección en un motor de IC deben satisfacer los siguientes requerimientos:

- a) Inyectar la cantidad demandada de combustible por la carga de la máquina y mantener dicha cantidad constante de ciclo a ciclo y de cilindro a cilindro.
- b) Inyectar el combustible en el tiempo correcto del ciclo durante todo el rango de velocidades del motor.
- c) Inyectar el combustible en la relación adecuada para controlar la combustión y el aumento de presión resultante.
- d) Atomizar el combustible al grado requerido.
- e) Distribuir el combustible a lo largo de toda la cámara de combustión.
- f) Iniciar y terminar la inyección de manera precisa [Obert, 1968].

La operación satisfactoria de los motores de IC depende de un adecuado control del flujo de aire y de la inyección del combustible. El sistema ideal de combustión debe tener salida y eficiencia altas, combustión rápida, un escape limpio y debe ser silencioso. En parte, dichos requerimientos son considerados contradictorios, debido a que la salida del motor está directamente limitada por los niveles de gases de escape [Stone, 1999].

2.2.1 Tipos de inyección

A pesar de la variedad de formas, todas las cámaras de combustión son construidas para realizar un buen desempeño, en términos de la economía de combustible, potencia y emisiones, cuando trabajan adecuadamente. Esto sugiere que la forma de la cámara es menos crítica en

comparación con un diseño cuidadoso para el movimiento del aire y una adecuada inyección [Stone, 1999]. Por el lugar en donde se inyecta el combustible, existen dos clases principales de cámaras de combustión en los motores de IC: aquellas con inyección directa en la cámara principal y las de inyección indirecta en alguna clase de cámara dividida. En la Figura 2.1 se muestra un diagrama cronológico y la comparación entre el sistema de carburación y los tipos de inyección mencionados.

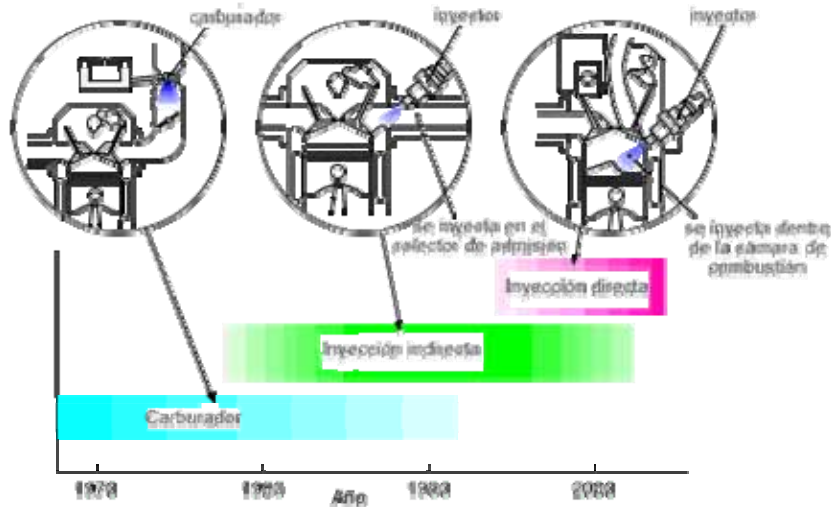


Figura 2.1. Carburación, inyección directa e indirecta [Bosch, 2008].

El sistema de carburación se hizo obsoleto desde 1990 aproximadamente, a partir de que la inyección de combustible resultó ser más precisa y eficiente, teniendo un mejor control sobre el consumo y las emisiones. Además, se simplificó el proceso de cambio de partes y se dio pie a nuevos avances en materia de alimentación, tales como la inyección estratificada y los sistemas electrónicos.

En los motores diesel de inyección directa, el flujo de aire más importante es el de remolino, es decir, la rotación ordenada del aire alrededor del eje del cilindro. Este movimiento puede ser inducido a través de las válvulas de admisión envueltas y del diseño del pasaje de entrada [Stone, 1999].

Desde hace más de 50 años, los sistemas de inyección directa de combustible han usado tres métodos de operación, que son los que se muestran a continuación [Obert, 1968]:

- 1. Bomba de inyección rotativa.-** Una sola bomba para introducir y comprimir el combustible, más un mecanismo divisor para distribuirlo a los diferentes cilindros.
- 2. Sistema de bomba individual.-** Una bomba para cada inyector y para cada cilindro que introduce y comprime el combustible.
- 3. Sistema de riel común.-** Una sola bomba para suministrar y comprimir el combustible, más un elemento administrador para cada cilindro.

Sin embargo, en la literatura [Stone, 1999] se establece que las altas presiones de inyección de combustible han venido a incrementar el uso de inyectores unitarios y sistemas de inyección de riel común en los últimos años. Los inyectores unitarios son aquellos en los que el elemento de bombeo y el inyector están unidos, con dicho elemento operando desde un árbol de levas en la cabeza del cilindro.

Los sistemas de inyección indirecta tienen una cámara de combustión dividida en una pre-cámara, donde el combustible es inyectado, y una cámara principal, con el pistón y las válvulas. El propósito de una cámara de combustión dividida es acelerar el proceso de combustión para incrementar la salida del motor, a través del incremento de la velocidad del mismo [Stone, 1999].

2.2.2 Inyectores

La parte más importante de un inyector de combustible es la boquilla, en la Figura 2.2 se muestran varios tipos de ellas. Por el tipo de boquilla se puede clasificar a los inyectores en:

- a) Inyectores de boquilla abierta.
- b) Inyectores de boquilla cerrada.

El tipo de boquilla más simple es la abierta. Su desventaja radica en las altas presiones de inyección encontradas a altas velocidades y la tendencia de la boquilla a gotear entre las inyecciones; sin embargo, representan un menor costo en la fabricación por la simplicidad de su construcción y tienen una menor tendencia a taparse por algún cambio en la presión de la mezcla. En la boquilla cerrada, las presiones de apertura y cierre de aguja están determinadas por la carga en el resorte y por el área proyectada de la aguja, por lo que en su construcción deben considerarse los cambios de presión que se presentan al momento de inyectar el combustible,

debido al movimiento del vehículo o la vibración en las partes del motor. Las boquillas abiertas son menos usadas que las cerradas porque, a pesar de que son menos propensas al bloqueo, tienden a gotear [Stone, 1999; Obert, 1968].

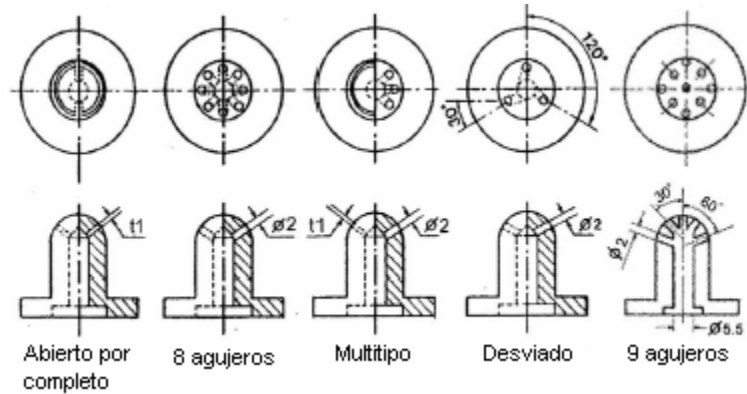


Figura 2.2. Cinco tipos de configuraciones de boquilla para un inyector de combustible [Lee y Kim, 2006].

En la Figura 2.2 se muestran algunas configuraciones de boquillas en los inyectores. Como se puede observar, la primera de ellas se refiere a la boquilla abierta, mientras que las otras configuraciones son del tipo de boquilla cerrada. Se puede pensar, para una toma de decisión, que la boquilla con mayor número de agujeros puede proporcionar una inyección de combustible más efectiva, contribuyendo a una mejor difusión de la mezcla en la cámara de combustión y, por lo tanto, una combustión más completa y menores emisiones. Sin embargo, la elección de la mejor boquilla depende del tipo de combustible y de la cantidad de mezcla requerida.

2.3 Motores de ignición por chispa

La gran mayoría de los motores de pistón recíprocante emplean la ignición por chispa para empezar el proceso de combustión. El control de la combustión, una vez que la flama se ha iniciado, puede ser guiado por los contornos de la cámara de combustión. Tales motores encuentran su mayor aplicación en el campo del transporte, donde el peso ligero es esencial. En el campo, donde se requiere mayor fuerza, los motores de carga estratificada de media y gran carga (baja velocidad y combustible gaseoso) son encontrados ocasionalmente.

En el motor de ignición por chispa, la flama empieza en la bujía y enciende una masa de carga muy pequeña (Figura 2.3). Como la flama se propaga primero desde el punto de ignición

como una superficie esférica o semiesférica, el área del frente de flama se vuelve más grande, y una masa de carga mayor se quema por cada incremento adicional en el movimiento de la flama [Obert, 1968].

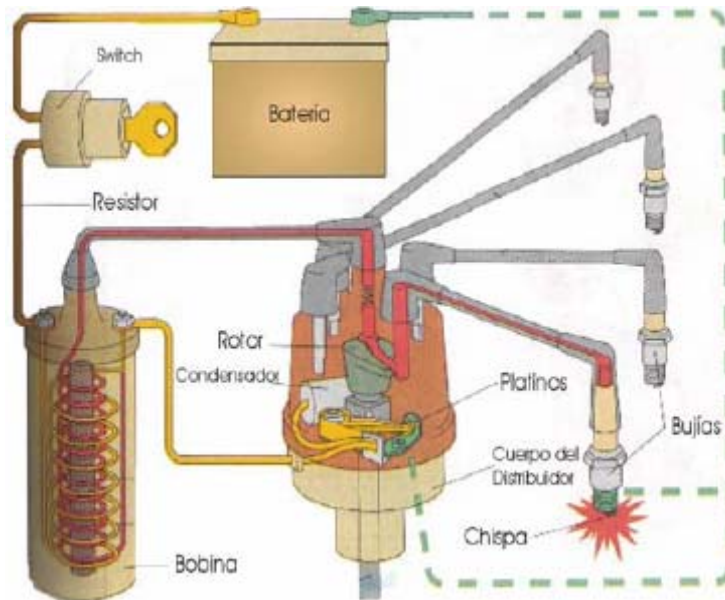


Figura 2.3. Diagrama de un sistema de ignición por chispa [Conae, 2007].

En primer lugar se tiene la carrera de admisión, en la que el pistón, arrastrado por el resto de las piezas móviles del motor, se desplaza desde el punto muerto superior al inferior, a la vez que la válvula de admisión permanece abierta durante toda la carrera permitiendo la admisión de la mezcla debido a la succión producida por el pistón.

Posteriormente se tiene la carrera de compresión, en la que desde el punto muerto inferior el pistón vuelve a desplazarse hasta el superior, encontrándose en esta carrera las válvulas cerradas, por lo que la mezcla se comprime.

En la carrera de combustión-expansión, cuando el pistón está alcanzando el punto muerto superior, se produce la chispa entre los electrodos de la bujía, lo que inicia la combustión de la mezcla, la súbita elevación de la temperatura provoca el aumento de la presión del gas que empuja el pistón hacia el punto muerto inferior, obligando al cigüeñal a girar. Esta será la única carrera que produce trabajo durante todo el ciclo.

Por último se da la carrera de escape, en la que se abre la válvula de escape y el pistón se desplaza desde el punto muerto inferior al superior, desalojando los gases quemados y volviendo a lo que se podría determinar posición inicial para comenzar de nuevo el ciclo [Font y Dols, 2001].

Actualmente, los sistemas de inyección en los motores de ignición por chispa se controlan de manera electrónica, obteniendo un mejor desempeño del motor, menos emisiones, un mejor rendimiento del combustible, arranque más rápido, entre otras ventajas. Por el lugar de inyección, se puede decir que, en general, se usa el método de inyección indirecta en este tipo de motores, ya que el inyector deposita la mezcla en la válvula de admisión, la cual introduce la misma en el cilindro.

2.3.1 Tipos de inyección

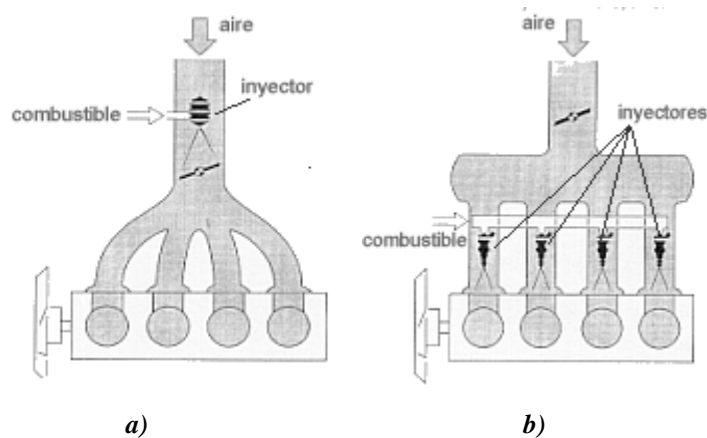


Figura 2.4. a) Sistema de inyección monopunto y b) sistema de inyección multipunto [Bosch, 2008].

Existen dos tipos de sistemas de inyección de combustible usados en los motores de ignición por chispa: inyección monopunto e inyección multipunto (Figura 2.4).

La inyección monopunto se puede ver como un carburador (aunque este sistema es más preciso) que, como en tal, la placa reguladora y el múltiple de entrada juegan un papel importante en la preparación de la mezcla. La principal característica es el empleo de un solo inyector que inyecta el combustible en un colector común a todos los cilindros. El suministro es continuo y la entrega se regula mediante la presión de inyección. Es un sistema más económico que la

inyección multipunto y suele emplearse en los motores más pequeños y en los automóviles más económicos [Font y Dols, 2001].

La inyección multipunto emplea inyectores usualmente colocados cerca al puerto de entrada de cada cilindro. Existen sistemas de inyección continua en los que la cantidad de combustible inyectado se regula mediante la presión de suministro del inyector, el cual es totalmente mecánico y en el que el cierre del inyector (posición de reposo) es ocasionado por una aguja presionada mediante un muelle contra su asiento que comunica con la tobera de salida. La apertura es provocada por la presión de inyección y el combustible se inyecta aunque la válvula de admisión esté cerrada, acumulándose éste en la pipa hasta que se abre la válvula y es arrastrado por la corriente de aire. También existen los sistemas de inyección intermitente, los cuales presentan la particularidad de inyectar una vez cada ciclo y la apertura de los inyectores está controlada por una señal eléctrica. Los sistemas intermitentes se dividen en simultáneos y secuenciales. En la inyección simultánea, los inyectores suministran combustible al mismo tiempo en los cilindros, siendo así que el combustible se inyecta en distintas carreras de los émbolos. En la inyección secuencial, los inyectores suministran durante la carrera de admisión de cada cilindro [Font y Dols, 2001].

El sistema de inyección monopunto es más barato que el multipunto, pero puede tener hasta un 10 por ciento menos de potencia de salida que este último, lo cual ayuda a la industria automotriz a la diferenciación de los productos. Incluso con los sistemas de inyección multipunto, una película líquida de combustible se desarrolla en las paredes del múltiple de entrada [Stone, 1999; Karim y Li, 2006].

2.3.2 Inyección de carga estratificada

Este tipo de inyección es usado en los motores de ignición por chispa. El principio detrás del concepto de carga estratificada es conseguir fácilmente una mezcla que pueda hacer ignición en la vecindad de la bujía, y una mezcla más ligera en el espacio restante de la cámara de combustión. El propósito de este arreglo es controlar la potencia de salida del motor variando únicamente el suministro de combustible sin regular el aire, eliminando así las pérdidas por regulación de la caída de presión. La estratificación de la carga se puede obtener por la división

de la cámara de combustión para producir una pre-cámara que contiene a la bujía y es donde se inyectaría el combustible [Stone, 1999].

Otro propósito de la carga estratificada es evitar el golpeteo y, por lo tanto, permitir mayores relaciones de compresión y/o combustibles de bajo grado. Una carga estratificada puede eliminar el golpeteo debido a que, para evitar dicho fenómeno, los gases finales necesitan ser mezclas no combustibles. Además, utilizando esta técnica, el tiempo de calentamiento del combustible en la cámara de combustión es corto porque se retrasa la inyección durante la compresión, de tal manera que es menor el tiempo que el gas permanece dentro de la cámara, contribuyendo así a evitar el golpeteo [Obert, 1968].

2.4 Revisión sobre inyectores

2.4.1 Inyectores convencionales

Se sabe que los inyectores electrónicos de gasolina que se han desarrollado no son apropiados para el hidrógeno, esto es por las grandes cantidades de volumen de combustible que se inyectan en una HICE, que a su vez se debe a la baja densidad energética del hidrógeno. Para esto se han diseñado inyectores electrónicos de combustible especiales para el gas natural y algunos se han desarrollado específicamente para el hidrógeno [Kabat y Heffel, 2002].

Las propiedades no lubricantes del hidrógeno podrían deteriorar la superficie de un inyector convencional en tan sólo unos minutos. Es por eso que se requiere de ciertas adaptaciones a las partes del sistema de inyección que entran en contacto directo con el combustible. Como se señala en la literatura [Kim y Lee, 2006], la alta presión a la que es almacenado el hidrógeno puede provocar que en un inyector convencional se den fugas de combustible, lo que requiere del uso de inyectores de alta presión.

Sin embargo, existen en el mercado inyectores de gas natural que han probado ser exitosos al fluir hidrógeno gaseoso en ellos [Westport Inc., 2008], lo que permite el uso de este combustible como aditivo o como alternativa al uso de dicho combustible fósil en un motor híbrido.

2.4.2 Inyectores de hidrógeno

Se han reportado resultados [Kabat y Heffel, 2002] de pruebas en ocho variantes de inyectores electrónicos de combustible modulados con ancho de pulso, con flujos de Hidrógeno puro. Tales inyectores fueron sometidos a tres diferentes programas de velocidades, con las características que se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Programas de velocidad a las que fueron sometidos ocho variantes de inyectores.

Velocidad	Frecuencia	Velocidad	Ancho de pulso	Presión de riel
Moderada (MOD)	15Hz	1800rpm	5ms	517,106Pa
Alta (HIGH)	35Hz	4200rpm	5ms	379,211Pa
Máxima (MAX)	50Hz	6000rpm	5ms	379,211Pa

Se determinaron 3 experimentos diferentes para hacer las pruebas. Dichos experimentos se describen a continuación:

1. **Experimento 1 (Operación continua).** Se corría con el MOD, con mediciones de flujo dos veces al día.
2. **Experimento 2 (Operación cíclica).** Los inyectores se hicieron funcionar de manera cíclica entre MOD-HIGH-MAX en un programa de 24h. 1h a MOD, 22h a HIGH y 1h a MAX.
3. **Experimento 3 (Operación intermitente).** Se aplicó sólo para los inyectores que seguían operando exitosamente. Se realizaba el experimento 2, pero en ciclos de 24h funcionando y 48h de apagado.

Las pruebas se dividieron en dos fases. La primera fase se aplicó para cuatro de los inyectores y la segunda para los cuatro restantes. En la Tabla 2.2 se presentan las secuencias de experimentos en cada fase respectiva, junto con los inyectores que presentaron un mejor desempeño durante las pruebas.

Tabla 2.2. Secuencias de experimentos en las dos fases de pruebas, con los inyectores que presentaron un mejor desempeño.

Fase	Inyector	Secuencia
Fase 1	Figura 2.5	<ul style="list-style-type: none"> • Experimento 1 por 500h. • Experimento 2 diez veces. • Experimento 3 tres veces.
	Figura 2.6	
Fase 2	Figura 2.6	<ul style="list-style-type: none"> • Experimento 1 por 250h. • Experimento 2 diez veces. • Experimento 3 tres veces. • Experimento 1 por 250h.

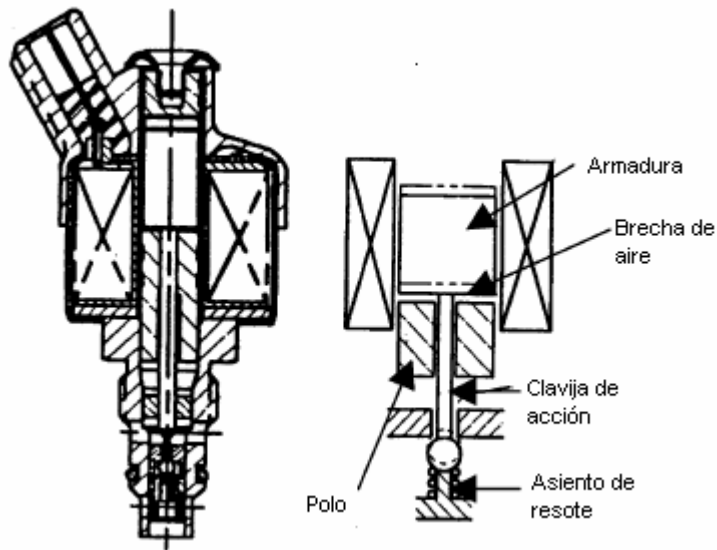


Figura 2.5. Inyector de esfera asentada sobre resorte [Kabat y Heffel, 2002].

Los resultados arrojaron, para la primera fase, que tres de los inyectores probados tuvieron un desempeño satisfactorio durante toda la secuencia. Los dos primeros fueron unos inyectores del mismo tipo, en los que el sistema medidor de combustible usa una esfera en configuración asentada, donde el movimiento de la armadura causa que una clavija de acción presione dicha esfera apoyada en un resorte, abriendo así el orificio de flujo (Figura 2.5). Tales inyectores, a pesar de que terminaron la secuencia satisfactoriamente, presentaron fallas en el programa de alta velocidad. En el primero de ellos, una película seca lubricante hecha a base de disulfuro de molibdeno, grafito y nitruro de boro hexagonal, en una resina epóxica a alta temperatura, es

aplicada a la clavija de acción y a los asientos, a través de un proceso de rocío. En el segundo, se tiene el mismo tipo de inyector, pero con un sistema de dos capas que emplea una capa inferior de silicón Cicloalifático Híbrido Avanzado (AHC, por sus siglas en inglés) y una capa superior de carbón enriquecido, que disminuye el coeficiente de fricción hasta 0.1.

El tercer inyector, que fue el que presentó un mejor comportamiento, ya que no presentó falla alguna, es un prototipo que emplea una alimentación del lado superior y una salida del inferior; el sistema medidor de combustible usa una armadura con resorte montado sobre una caña, como se muestra en la Figura 2.6.

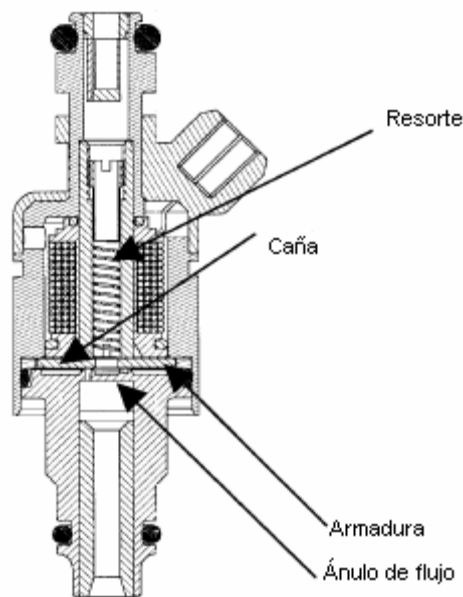


Figura 2.6. Inyector de resorte montado sobre una caña [Kabat y Heffel, 2002].

Para la segunda fase, únicamente dos de los cuatro inyectores a prueba terminaron la secuencia de experimentos. Tales inyectores fueron del tipo de la Figura 2.6, pero con dos diferentes variantes en el recubrimiento aplicado a su superficie. El primero de ellos tenía un recubrimiento de silicón AHC a alta temperatura (500°C), conteniendo carbono hidrogenado amorfo aplicado a través de un proceso de deposición por vapor químico. El proceso produce un coeficiente de fricción seco de $\sim 0.14-0.16$, un rango de dureza de $\sim 12-15$ GPa (Giga Pascales) y un grosor de $2-4 \mu\text{m}$. La segunda variante del inyector que superó la secuencia de pruebas tenía un material conocido como MelonitaTM, que no es un recubrimiento en sí, sino más bien una conversión química en donde el nitrógeno, carbono y oxígeno son difundidos en la superficie de

metales férricos para crear una capa compuesta templada; ésta reduce el coeficiente de fricción a ~ 0.3 , mientras que incrementa la dureza a $\sim 55-60\text{HRc}$ (dureza Rockwell tipo C) [Kabat y Heffel, 2002].

Lee y Kim [Lee y Kim, 2006] introdujeron un motor alimentado con gas hidrógeno que funciona con inyección dual, es decir, tiene la ventaja de poseer la alta eficiencia de un motor de hidrógeno de mezcla externa y la alta potencia de uno de inyección directa. Para esto fue desarrollado un inyector de hidrógeno de alta presión y válvula semiesférica accionada por un solenoide, que estaría situado en el interior del cilindro, y conectado a un inyector de admisión, encargado de realizar la inyección externa. El inyector de alta presión fue desarrollado para ser capaz de mantener el confinamiento del gas, a pesar de la alta presión del hidrógeno (Figura 2.7); además, las partes de dicho dispositivo que estarán en contacto con el hidrógeno soportan las características no lubricantes del gas. Juntos, ambos inyectores deben controlar la cantidad de combustible inyectado bajo condiciones de alta velocidad.

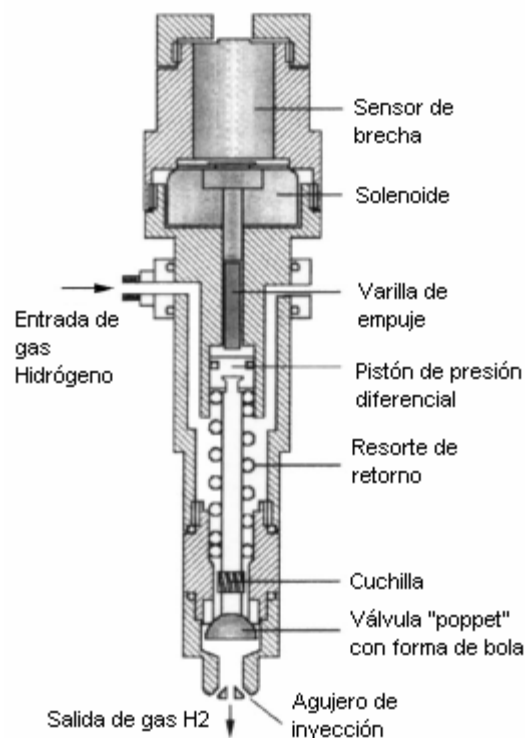


Figura 2.7. Diagrama esquemático de corte del inyector de Hidrógeno de alta presión de tipo válvula de bola y solenoide actuador [Kabat y Heffel, 2002].

El actuador de solenoide, comparado con un actuador hidráulico, puede controlar fácilmente los parámetros de inyección y tiene una respuesta más rápida ante operaciones de alta velocidad. Debido a la alta presión del hidrógeno y a la tensión del resorte, se utiliza el principio de diferencia de presiones para abrir y cerrar la válvula semiesférica. Esto se debe a que la superficie del pistón es ligeramente mayor que la de la válvula semiesférica; así, dicha diferencia de presiones hace que esta última se cierre automáticamente. Por otra parte, la válvula encaja perfectamente en el asiento, ya que ambos son de forma esférica, además de que la rotación de la misma tiene un efecto pulidor sobre el asiento que contribuye a mantener el confinamiento del gas.

En el Instituto Tecnológico de Beijing se hizo la conversión de un motor de combustión interna de cuatro cilindros e ignición por chispa para funcionar con hidrógeno [Liu et al., 2008]. Una de las partes principales del trabajo consistió en la modificación y calibración de ocho inyectores de la marca italiana Landirezzo (dos para cada cilindro), los cuales están originalmente diseñados para inyectar gas natural comprimido. En la Figura 2.8 se muestra la gráfica de la curva característica de inyección para dicho inyector, a una presión de 2bar, hallada a partir de la experimentación hecha por Liu.

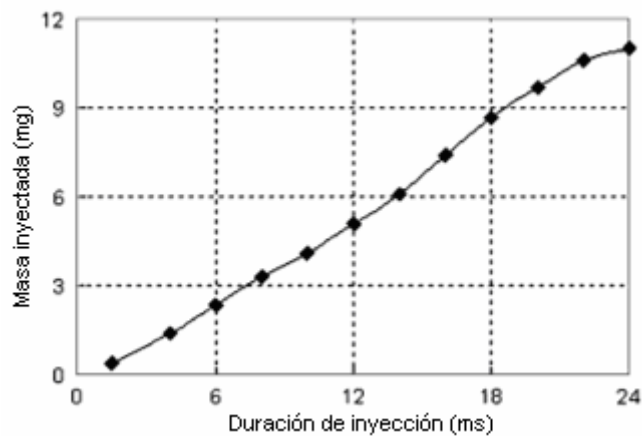


Figura 2.8. Masa de inyección de hidrógeno a 2bar [Liu et al., 2008].

Como se puede observar, la relación de la masa inyectada con respecto a la duración de la inyección sigue una tendencia más o menos lineal, hasta que llega a los 24ms de inyección, donde empieza a disminuir el incremento de la cantidad de combustible. Se debe recordar que, debido a la baja densidad del hidrógeno, se requiere de una inyección de masa de hidrógeno

mayor que el de la gasolina, por lo que se recomienda ajustar el tiempo de inyección hasta el punto de estabilización que se observa en la gráfica, sin excederse en el mismo, para evitar los fenómenos anormales de la combustión.

Al realizar simulaciones sobre el tiempo de inyección, los autores observaron tres fenómenos que sucedían al retardar el final de la inyección, medido en grados de ángulo Crank (CA), es decir el ángulo entre la manivela y el eje del cigüeñal:

1. Si se pospone el final de la inyección, la concentración de mezcla residual de hidrógeno en el puerto de entrada decrece, en primera instancia, y luego crece instantáneamente.
2. Cuando el final de la inyección se da más allá de los 520° CA, habrá cada vez más hidrógeno residual en el puerto de entrada después del cierre de la válvula de entrada, con el retraso del final de la inyección.
3. Cuando el final de la inyección se da antes de los 500° CA, la concentración de hidrógeno residual en el puerto de entrada se mantiene aproximadamente en el mismo valor.

2.5 Situación en el Mercado

La empresa Hoerbiger [Hoerbiger, 2007], de origen austriaco, ha desarrollado e introducido al mercado sus sistemas de inyección de hidrógeno, que incluyen:

1. Válvulas de solenoide de alta velocidad.
2. Inyector de alta presión de válvula de solenoide de alta velocidad.
3. Inyector de media presión de válvula de solenoide de alta velocidad.
4. Inyector de baja presión de válvula de solenoide de alta velocidad.

Por su parte, la empresa canadiense Westport fabrica inyectores de combustible gaseoso e inyección directa diseñados para motores diesel. Son capaces de soportar las características que presentan los combustibles compresibles y están diseñados para manejar:

- El alto flujo volumétrico requerido para combustibles de baja densidad.
- La conducción compleja de dos combustibles.

- La carbonización y las fluctuaciones térmicas que surgen de la capacidad de enfriamiento limitada de un combustible gaseoso.
- Los cambios bruscos de presión y las fugas.



Figura 2.9. Inyector de gas natural comprimido e hidrógeno [Westport, 2008].

En especial, han desarrollado un tipo especial de inyector, el cual es capaz de trabajar con gas natural comprimido e hidrógeno. La ignición se da generalmente por una bujía incandescente que opera continuamente. Este inyector, el cual se muestra en la Figura 2.9 funciona en un sistema de tipo riel común y es accionado directamente, lo cual permite una flexibilidad casi ilimitada en la inyección y un gran control sobre la velocidad de la misma. Además de esto, reporta la empresa, con el uso de este inyector se conserva la potencia y la eficiencia del motor diesel [Westport, 2008].

Esta misma empresa ha desarrollado un inyector de inyección directa para suministrar hidrógeno en la cámara de un motor de combustión interna (Figura 2.10). La combustión de la mezcla ligera se puede iniciar a través de una superficie caliente o de una bujía. Su aplicación, según esta empresa, se encuentra en los pequeños vehículos de ciudad, pequeñas camionetas, autobuses y carros de pasajeros. Entre sus ventajas se encuentran:

- Operación similar al ciclo diesel, con alta potencia y alta eficiencia.
- Emisiones tóxicas y de gases de efecto invernadero cercanas a cero.
- Emisiones muy bajas de óxidos nitrosos.
- Eliminación del retroceso de flama y la pre-ignición que limita la salida de potencia.



Figura 2.10. Inyector de hidrógeno para inyección directa [Westport, 2008].

Asimismo, el Centro de Ingeniería Avanzada de Superficies, de la Asociación de Industria Navarra [AIN, 2008], en España, se dedica a los recubrimientos por Deposición Física de Vapor (PVD, por sus siglas en inglés). Dicho método consiste en depositar capas finas, de aproximadamente 2 micras de espesor, depositadas en alto vacío a partir de materiales precursores evaporados por medios físicos.

En especial, los recubrimientos tribológicos que se realizan en este Centro, combinan alta dureza (2.92GPa) y bajo coeficiente de fricción (0.2), y están diseñados para aplicaciones automotrices, incluyendo inyectores, que requieren baja fricción.

2.6 Conclusiones

Existen ya en el mercado inyectores adaptados para trabajar con hidrógeno. En México se puede desarrollar tecnología para producir dichos inyectores. Es posible inyectar hidrógeno en un motor de combustión interna, pero se requieren de modificaciones estructurales en el diseño de inyectores o adaptaciones a los ya existentes, para responder a los requerimientos técnicos que implica el flujo de hidrógeno en estos dispositivos.

En el campo de la investigación científica, para un proyecto futuro, se recomienda el uso de inyectores de gas natural comprimido, el cual ha demostrado ser útil para su aplicación en los motores alimentados con hidrógeno. Asimismo, se ha demostrado que los inyectores electrónicos

tienen un mejor control sobre el tiempo de inyección y la cantidad de combustible inyectado, por lo que se recomienda su uso experimental.

Se requiere de investigación en materiales de alta dureza y bajos índices de fricción para ser aplicados como recubrimientos a las superficies internas de los inyectores y aquéllas que entran en contacto directo con el hidrógeno, aumentando así, el tiempo de vida y mejorando la funcionalidad de las distintas partes del sistema de alimentación. Para esto se requiere de equipo de laboratorio especializado en materiales y recubrimientos por distintos métodos, tales como la deposición por vapor químico y por rocío. Asimismo, se recomienda el estudio sobre sistemas tribológicos para mejor entendimiento del flujo del hidrógeno entre las paredes de los inyectores y las mangueras del sistema de inyección.

Para la factibilidad de la inyección del hidrógeno se presentan, en la Tabla 2.3, una serie de especificaciones para los dos principales tipos de motores de combustión interna.

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas de factibilidad para la experimentación sobre inyección de hidrógeno.

Tipo de motor	Técnica a aplicar	Adaptación que se sugiere	Metodología experimental
Ignición por chispa	Se sugiere iniciar con el uso de inyectores de gas natural comprimido, marca Landirengo, que operen a presiones de 2 bar en adelante.	Realizar recubrimientos de silicón AHC, a través de la deposición por vapor químico, con la finalidad de lograr índices de fricción por debajo de 0.3, y durezas por arriba de los 10GPa.	Realizar pruebas de ciclos continuos de funcionamiento, de duración prolongada (24h), para conocer los límites del desempeño de los inyectores sugeridos.
Ignición por compresión	Se recomienda el uso de dos inyectores, primero para la inyección del inductor de la ignición (inyector convencional de diesel) y el otro para la inyección de hidrogeno, marca Westport.	Se debe considerar el desarrollo de un sistema de suministro o inyección variable, basado en la admisión de diesel por un número de ciclos determinado, para posteriormente admitir en porcentajes graduales al hidrógeno.	Implementación de medidores de caudal en los sistemas de inyección que permitan controlar las proporciones de la mezcla diesel/hidrogeno, midiendo al mismo tiempo la potencia de salida, mediante un sistema de dinamómetros.

2.7 Referencias

- Kabat, D. M., Heffel, J. W. Durability implications of neat hydrogen under sonic flow conditions on pulse-width modulated injectors, *International Journal of Hydrogen Energy* **27** (2002) 1093-1102.
- Karim, G. A., Li, H. Hydrogen fueled spark-ignition engines predictive and experimental performance, *Journal of engineering for gas turbines and power* **128** (2006) 230-236.
- Kuo, K. Principles of combustion (J. Wiley, New York, 1986).
- Lee, J. T., Kim, Y. Y. The development of a dual injection hydrogen fueled engine with high power and high efficiency, *Journal of engineering for gas turbines and power* **128** (2006) 203-212.
- Liu, X-h, Liu, F., Zhou, L., Sun, B. y Schock, H. Backfire prediction in a manifold injection hydrogen internal combustion engine, *International Journal of Hydrogen Energy* (2008). En prensa.
- Obert, E. Internal combustion engines (2a ed., International Textbook Company, Scranton, 1968).
- Stone, R. Introduction to internal combustion engines (3a ed., Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, 1999).
- www.ain.es
- www.bosch.com
- www.hoerbiger.com
- www.westport.com

CAPÍTULO III

SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Resumen

En este capítulo se aborda el tema del enfriamiento, o refrigeración, de los motores de combustión interna convencionales y alimentados con hidrógeno. Se describen algunas partes importantes del sistema y sus principios de funcionamiento. Asimismo, se establece un panorama sobre las ecuaciones más importantes que describen la transferencia de calor en un motor de combustión interna, con el objeto de atacar los aspectos relevantes que influyen en el calentamiento excesivo de un motor.

Como parte principal se pretende establecer la relación entre el sistema el enfriamiento y la combustión de las diferentes mezclas que se dan en la cámara, a diferentes relaciones de equivalencia. Lo anterior se menciona con el objeto de reducir las pérdidas por enfriamiento, teniendo una combustión más estable y completa de la mezcla aire/combustible.

Basado en un modelo establecido por diversos autores, en donde se hace la determinación de perfiles de temperatura en zonas de la cámara, se analizan y se establecen ciertas condiciones. Esto resulta importante para determinar la solución al problema de enfriamiento.

Por último se dan a conocer las conclusiones sobre lo dicho anteriormente, para ofrecer algunas recomendaciones y establecer las mejores condiciones de enfriamiento en un motor de hidrógeno, a fin de aumentar la eficiencia del motor y reducir las pérdidas que se dan por enfriamiento.

3.1 Generalidades sobre enfriamiento de motores

Se denomina sistema de enfriamiento en un motor a aquellos elementos encargados de extraer calor del motor y disiparlo al ambiente. Existen tres razones para enfriar un motor:

1. Mejorar la eficiencia volumétrica.
2. Asegurar una combustión adecuada.
3. Asegurar una operación mecánica confiable.

Mientras más frías sean las paredes de la cámara de combustión, es mayor la cantidad de mezcla que se puede introducir en el cilindro y, por lo tanto, se obtiene una mayor eficiencia volumétrica y una mayor potencia de salida [Font y Dols, 2004; Stone, 1999].

Hay tres maneras en las que el sobrecalentamiento puede afectar el desempeño mecánico del motor. Primero, dicho sobrecalentamiento puede disminuir la dureza de las partes y provocar su deformación. Segundo, la temperatura de la ranura del anillo ubicado en la parte superior del pistón debe ser limitada a los 200°C (dependiendo del lubricante utilizado), o de lo contrario se puede sufrir de la degradación del lubricante. Finalmente, la tensión térmica puede provocar la falla permanente del motor [Stone, 1999].

El modo de operar del sistema de enfriamiento debe adaptarse al fluido refrigerante que se utilice. Los sistemas de enfriamiento más utilizados se clasifican en [Font y Dols, 2004]:

1. Enfriamiento por líquido.
2. Enfriamiento por aire.

3.1.1 Enfriamiento por líquido

En la Figura 3.1 se muestran los elementos que componen en general un sistema de enfriamiento por agua. Normalmente el agua fluye rodeando los cilindros y la cámara de combustión, de donde se transmite el calor. El agua fluye mediante una bomba centrífuga que impulsa el líquido desde la zona inferior del motor, y la hace circular a presión por los conductos que hay alrededor de las áreas calientes: los cilindros, las cámaras de combustión, las válvulas y las bujías. El agua sale por la culata, donde se encuentra un sensor de temperatura. De ahí se dirige a un termostato que controla la dirección del líquido, enviándolo al motor si se encuentra por debajo de la temperatura requerida, o de lo contrario, a un radiador que la enfría mediante una corriente de aire provocada por la marcha del vehículo y por un electroventilador que se conecta mediante la acción de un termointerruptor [Font y Dols, 2004]. El agua pasa por medio de una

manguera a la parte superior del radiador y fluye por una serie de tubos conectados a las aletas de enfriamiento que están expuestas al aire libre. El refrigerante líquido se prefiere al aire, porque es menos ruidoso y es más capaz de mantener una temperatura constante en los cilindros. El calor es transferido del refrigerante al aire que pasa forzado por los conductos del radiador al ser aspirado por el ventilador y el movimiento hacia adelante del automóvil [Stone, 1999].

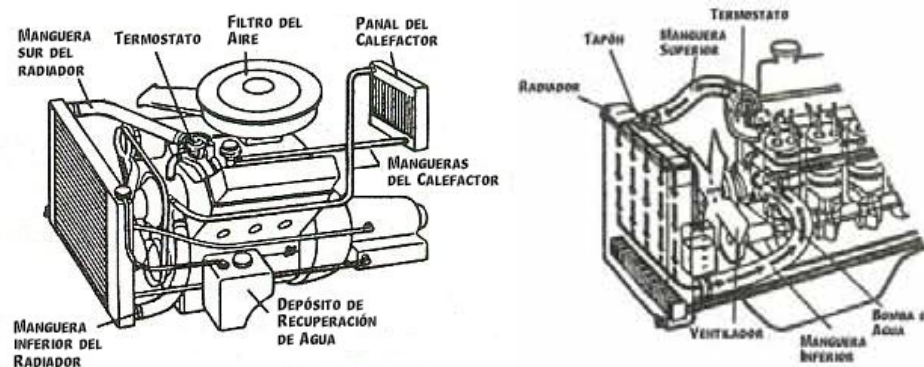


Figura 3.1. Elementos de un sistema de enfriamiento de un motor de combustión interna [WWW, 2008].

Un elemento de suma importancia en el sistema de enfriamiento es el radiador. Hay dos tipos básicos de radiadores, los de flujo descendente y los de flujo transversal. En los radiadores de circulación descendente el agua entra por la parte superior y baja después por una serie de pequeños conductos. En el radiador de circulación transversal el agua caliente entra por la izquierda y circula por los dos conductos hasta el tanque receptor, a la derecha del tapón y el enfriador de la transmisión automática está en el extremo frío del radiador.

Es usual la utilización de aditivos para inhibir la oxidación de las partes metálicas del circuito, y el empleo de anticongelantes que, mezclados en distintas proporciones disminuye la temperatura de fusión del agua (hasta -60°C , a una concentración del 50%). La temperatura de ebullición se puede aumentar presurizando el circuito, haciendo que trabaje a una presión mayor que la atmosférica, con lo que la temperatura normal de funcionamiento del refrigerante puede situarse entre 100 y 105°C , frente a los $90-95^{\circ}\text{C}$ a presión atmosférica.

3.1.2 Enfriamiento por aire

El principio de funcionamiento es el mismo que el del agua, pero usando el aire del ambiente como fluido, que se hace circular a través de un ventilador, elemento suficiente para que se dé

este tipo de enfriamiento. Puesto que el aire presenta un coeficiente de convección menor que el agua y su capacidad calorífica también es mucho más pequeña, para extraer la misma cantidad de calor se hace necesario que aumente la superficie de disipación, lográndose a través del uso de aletas provistas al cilindro, como se observa en la Figura 4.2. En caso de que la velocidad relativa del aire respecto del motor sea suficiente, el sistema no necesita ningún elemento más.

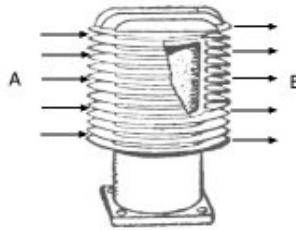


Figura 3.2. Cilindro provisto de aletas enfriado por medio de una corriente de aire AB.

Las aletas suelen estar situadas con una separación entre 4 y 8mm, mientras que los caudales máximos de aire necesarios para enfriar el motor oscilan alrededor de los que se indican a continuación, considerando que la temperatura del aire es de 40°C (unidades en m³/kW h):

- Motores de gasolina: de 40 a 70.
- Motores Diesel de Inyección Directa: de 50 a 60.
- Motores Diesel de Inyección Indirecta: de 60 a 75.

Los sistemas de enfriamiento mediante aire suelen estar apoyados por el sistema de lubricación, que utiliza el aceite también como vehículo de enfriamiento, por lo que es usual que este tipo de motores cuenten con un pequeño radiador para enfriar el aceite lubricante [Font y Dols, 2004]. Estos sistemas son frecuentemente encontrados en motores de baja salida, donde la simplicidad, en ausencia de otro medio de enfriamiento, se presenta como una ventaja. Una de las desventajas que presenta consiste en el ruido provocado por las siguientes razones:

1. Las paredes de la cámara de combustión pueden radiar sonido.
2. La estructura del motor tiende a ser menos rígida.
3. El ventilador de enfriamiento genera movimiento significativo de aire.

3.1.3 Enfriamiento de motores de ignición por compresión

En el caso de los motores diesel, los sistemas de enfriamiento por líquido, empleando agua, son usados generalmente para enfriar la línea de cilindros de los motores diesel avanzados. Por otro lado, el enfriamiento por aire es conveniente para motores pequeños de petróleo, industriales y de propósitos especiales [Trenc et al., 1998].

El flujo de calor al refrigerante es mayor en los motores de inyección indirecta que en los de directa, debido a que se da un mayor coeficiente de transferencia en la regulación, lo cual lleva a una mayor pérdida de calor por parte del contenido del cilindro. Los motores de inyección indirecta suelen tener un enfriador del aceite lubricante, que normalmente usa al refrigerante del motor como medio para enfriarse. Los motores de inyección directa normalmente sirven para salidas pequeñas, lo cual hace innecesario un enfriador de aceite [Stone, 1999]. Además, como se observa en la Ecuación (3.1), el flujo de calor al refrigerante se expresa generalmente como función de la velocidad de flujo del combustible. Dicha expresión se halló a partir de un cilindro con una carrera de volumen de 1.78 litros e inyección directa. Sin embargo, se observa en dicha relación que existen dependencias adicionales: la constante de proporcionalidad incrementa con la velocidad y con el decremento de la presión.

$$Q_C \propto (m_f)^{0.64} \quad (3.1)$$

donde Q_C es el calor entregado al refrigerante y m_f la velocidad de flujo del combustible. El flujo de calor al refrigerante se mantuvo en el rango de 18-34% de la energía del combustible.

Trenc y colaboradores han publicado trabajos acerca del enfriamiento de los cilindros en motores diesel avanzados. En ellos se establece que un sistema perfecto de enfriamiento permitiría tener isotermas de temperatura moderada alrededor y a lo largo de las paredes del cilindro. Además, la incrementada asimetría en la temperatura de la pared, debida los altos gradientes de temperatura en un motor real, está localizada en el cuarta parte más alta de la altura del cilindro. Por esto mismo, propuso un canal transversalmente rectangular y curvilíneo a lo largo del mismo, alimentado con aceite del motor, insertado en la parte superior del cilindro enfriado por aire. En dicho trabajo se hizo investigación tanto experimental como de simulación y

se llegaron, para el interés del presente trabajo, a tres conclusiones importantes [Trenc et al., 1998]:

1. La camisa de enfriamiento de un motor diesel avanzado debe ser estrecha, de aproximadamente $1/3$ de la longitud total del cilindro y con la entrada y salida asimétricas del flujo del refrigerante.
2. Se requiere menor energía para transportar el refrigerante cuando el flujo del mismo es laminar, reduciendo así la fricción, y la camisa de enfriamiento es corta.
3. Si se requiere de un mayor enfriamiento cuando el pistón se encuentra cercano al punto muerto superior, se puede añadir un pequeño canal horizontal con aceite lubricante.

3.1.4 Enfriamiento de motores de ignición por chispa

En el caso de los motores de ignición por chispa, el enfriamiento inhibe la ignición espontánea de la mezcla aire/combustible. Dicho fenómeno puede afectar una cantidad significativa de mezcla, dando lugar a aumentos repentinos de presión, detonación y golpeteo, ya que esencialmente este tipo de motores manejan mezclas homogéneas.

El calor entregado al refrigerante en un motor de ignición por chispa está en función de la velocidad, carga, tiempo de ignición y relación aire/combustible. El flujo de energía al refrigerante es un reflejo de la manera en la que la salida del motor responde a la variación de la relación de equivalencia. Esto se debe a que el trabajo de salida y el calor entregado al refrigerante dependen de la temperatura de combustión.

El retraso del tiempo de ignición conlleva al incremento del valor absoluto del calor entregado al refrigerante si la regulación, velocidad y relación de equivalencia se mantienen fijas. Una ignición temprana causa temperaturas más altas en los gases quemados y no quemados, lo cual conduce a un mayor calor entregado de la cámara de combustión al refrigerante.

Con un incremento de la relación de compresión también se incrementa la temperatura de los gases en el interior del cilindro, pero no necesariamente lleva a un incremento en el flujo de calor entregado al refrigerante. Esto se debe a que se incrementa el trabajo de salida con cada carga iniciada y la temperatura de escape es disminuida. Como consecuencia, el calor rechazado a la

válvula de escape y al puerto de escape es reducido, y se inhibe el incremento del flujo de calor desde la cámara de combustión [Stone, 1999].

3.2 Aplicación de las ecuaciones de transferencia de calor

Las temperaturas más altas de los gases de combustión en el cilindro de un motor convencional se encuentran alrededor de los 2500K. Las temperaturas máximas del metal que se encuentra en la parte interna de la cámara de combustión están limitadas a valores mucho más bajos que el mencionado, por lo que se requiere enfriamiento para la cabeza del cilindro, y los pistones [Heywood, 1989]. Dichos requerimientos provocan que se den flujos de calor del gas hacia las paredes de la cámara de combustión alrededor de 10 MW/m², durante el período de combustión. Sin embargo, durante otros puntos del ciclo, el flujo de calor es esencialmente cero. El flujo varía en gran medida según el lugar donde se mida; por ejemplo, las regiones de la cámara que están en contacto con los gases de combustión a alta temperatura moviéndose rápidamente son las que experimentan los flujos más altos.

La transferencia de calor afecta el desempeño, eficiencia y emisiones del motor. Se ha trabajado experimentalmente con motores para establecer las distribuciones de temperaturas en determinadas regiones de la cámara de combustión [Heywood, 1989; Stone, 1999].

En el presente trabajo se realizó un estudio de transferencia de calor unidimensional, en estado transitorio, con el objetivo de conocer la distribución de temperaturas a través de la pared del cilindro. Para esto es necesario resolver la ecuación del flujo de calor, que se presenta a continuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (3.2)$$

donde α es la difusividad térmica, definida como $\alpha = k / \rho c$, en la que k es la conductividad térmica, ρ es la densidad y c es la capacidad calorífica del material. Un método relativamente simple para resolver el flujo de calor superficial es el de diferencias finitas. En la Figura 3.4 se muestra la configuración usada para dicho método. La principal ventaja de resolver la Ecuación (3.2) en estado transitorio, sobre el estado estable, es que el primero de ellos permite establecer

los flujos de calor instantáneo y medio. Por otra parte, dada la pequeña duración del ciclo en un motor de combustión interna, no se puede alcanzar un flujo de calor en estado estable.

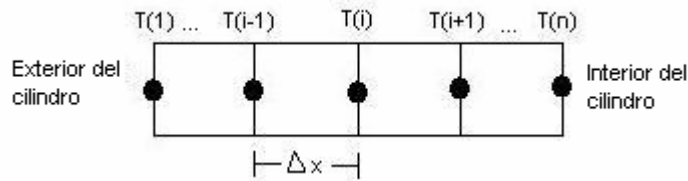


Figura 3.3. Sección lateral de la pared del cilindro de un motor. Se encuentra dividido en volúmenes de control para la solución del flujo de calor unidimensional en estado transitorio.

En la literatura [Versteeg y Malalasekera, 1995] se encuentran las aproximaciones numéricas a la ecuación del flujo de calor, las cuales se pueden resolver con la aplicación del algoritmo de la matriz tridiagonal (TDMA). Más adelante, en la sección 3.4 del presente capítulo, se propone un método para controlar el calentamiento del cilindro en un motor alimentado con hidrógeno, usando dos fronteras de convección y en estado transitorio.

3.3 Enfriamiento en los motores de hidrógeno

El estudio de la transferencia de calor en las máquinas de combustión interna ha sido tratado desde el punto de vista de varios autores. La investigación sobre las pérdidas por enfriamiento en los motores de hidrógeno funciona como apoyo en la decisión de las mejores técnicas y estrategias a tomar para enfriar un motor y evitar el calentamiento excesivo. Dichas pérdidas han sido estudiadas y reportadas en la literatura científica. La disminución de dichas pérdidas permite tener un mejor control de la temperatura de las partes del motor.

En la Tabla 3.1 se muestran propiedades importantes de algunos combustibles, incluyendo el hidrógeno, que influyen en las condiciones que se deben tener para el sistema de enfriamiento del motor en el que se usen. En ella se puede observar que el límite de flamabilidad, por ejemplo, es más amplio en el hidrógeno que en los otros dos combustibles, lo que significa que puede haber combustión a condiciones muy diversas. Asimismo, el calor de combustión en el hidrógeno es mayor que en la gasolina, lo cual se refleja en el aumento de temperatura en los alrededores de la cámara de combustión.

Tabla 3.1. Comparación de las características de combustión de la gasolina, el gas natural comprimido y el hidrógeno [White y Steeper, 2006]. (* A condiciones estequiométricas.)

	Hidrógeno	Gas natural comprimido	Gasolina
Límite de flamabilidad (%)	4-75	4.3-15	1.4-7.6
Temperatura de flama adiab. (K)*	2480	2214	2580
Calor de combustión (MJ/kg_{aire})*	3.37	2.9	2.83
Temperatura de autoignición (K)*	858	723	550

Con esto se puede decir que el sistema de enfriamiento en un motor de hidrógeno debe ser capaz de mantener el motor a una temperatura adecuada de funcionamiento, a pesar de que las características del hidrógeno como combustible conllevan incrementos más altos de temperatura que los combustibles usados actualmente, como es el caso de la gasolina y el gas natural.

3.3.1 Pérdidas por enfriamiento

La rapidez aparente de liberación de calor calculada a partir de un diagrama de presión depende de la pérdida por enfriamiento del gas ubicado en el interior del cilindro a la pared de la cámara de combustión. La rapidez real de liberación calor $dQ_B/d\theta$ se puede describir a partir de la rapidez aparente de liberación de calor $dQ/d\theta$ y de la rapidez de enfriamiento $dQ_C/d\theta$ [Shudo y Nabetani, 2001] como sigue

$$\frac{dQ_B}{d\theta} = \frac{dQ}{d\theta} + \frac{dQ_C}{d\theta}, \quad (3.6)$$

donde θ es el ángulo Crank, es decir, el ángulo entre la manivela y el eje del cigüeñal, el cual va cambiando con la posición del émbolo en el cilindro. Las rapidezces aquí expresadas se miden con respecto a dicho ángulo. La liberación de calor acumulada por ciclo Q_B viene dada por

$$Q_B = Q + Q_C, \quad (3.7)$$

donde los términos de la derecha son la liberación de calor aparente acumulada y la pérdida por enfriamiento acumulada. Además, Q_B se puede expresar como el producto de la eficiencia de combustión η_u por el calor del combustible por cada ciclo Q_{fuel} ,

$$Q_B = \eta_u Q_{fuel}, \quad (3.8)$$

de donde se obtiene

$$\eta_u Q_{fuel} = Q + Q_C. \quad (3.9)$$

Como método para estimar la pérdida por enfriamiento acumulada, se han desarrollado un grupo de ecuaciones que describen la transferencia de calor en la pared de la cámara de combustión del motor. Tales ecuaciones incluyen las de Woschni, Eichelberg, Briling, Nusselt y Van Tyen, las cuales se derivaron empíricamente de la ecuación de transferencia de calor en flujos turbulentos para un tubo circular, para describir un coeficiente de transferencia de calor promediado, de la superficie total de la pared de la cámara de combustión. La rapidez de enfriamiento se expresa ahora $dQ_w/d\theta$ y es calculada usando el coeficiente de transferencia de calor h [Shudo y Suzuki, 2002],

$$\frac{dQ_w}{d\theta} = \frac{hA(T_g - T_w)}{6n}, \quad (3.10)$$

donde T_g es la temperatura media del gas en el interior del cilindro y T_w es la temperatura en la pared de la cámara de combustión. A es el área superficial de la cámara de combustión y n es la velocidad del motor, medida en *rpm*.

La rapidez aparente de liberación de calor $dQ/d\theta$ se ha calculado como

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{V \frac{dP}{d\theta} + \gamma P \frac{dV}{d\theta}}{\gamma - 1} - \frac{PV}{(\gamma - 1)^2} \frac{d\gamma}{d\theta}, \quad (3.11)$$

donde el índice de calores específicos γ es considerado como una variable y calculado por la composición y la temperatura media del gas en el cilindro. Al integrar la función anterior se obtiene la liberación de calor aparente acumulada. V y P son el volumen y la presión en el interior del cilindro.

A partir de las relaciones anteriores se puede introducir una nueva variable, conocida como índice de pérdida por enfriamiento, que se expresa como

$$\phi_w = Q_c / Q_B, \quad (3.12)$$

de donde se puede obtener

$$\phi_w = 1 - \frac{Q}{\eta_u Q_{fuel}}. \quad (3.13)$$

La liberación de calor del hidrógeno es más alta que la de otros combustibles porque el proceso de combustión se completa en un período de tiempo más corto, por la alta velocidad de la flama. Una liberación aparente negativa de calor al final del proceso y los cambios en la temperatura de la pared del cilindro durante el mismo son significativos en la combustión del hidrógeno, lo que provoca una mayor pérdida por enfriamiento en los motores que usan este combustible [Shudo y Suzuki, 2002].

3.3.2 Reducción de pérdidas por enfriamiento

Investigaciones hechas en la universidad de Hokkaido, en Japón, sobre las pérdidas por enfriamiento, han aportado técnicas para evitar el calentamiento excesivo, reducir dichas pérdidas y aumentar la eficiencia térmica al mismo tiempo. En particular, se realizaron pruebas con carga estratificada, que consiste en introducir una ligera carga de hidrógeno y aire previamente mezclada en la cámara y posteriormente se añadió hidrógeno directamente inyectado e iniciado con una descarga.

Se ha propuesto la inyección de carga estratificada como una técnica para reducir las pérdidas por enfriamiento. Sin embargo, una reducción de estas pérdidas no siempre mejora la eficiencia térmica debido al incremento simultáneo de las pérdidas por calor de escape [Shudo, 2007]. El

retardo del tiempo de ignición de la chispa puede hacer decrecer la pérdida por enfriamiento disminuyendo la máxima temperatura de combustión.

Una carga estratificada a inyección directa de una mezcla ligera reduce la transferencia de calor del gas de combustión a las paredes de la cámara de combustión e incrementa la fracción de desecho de calor aparente en la combustión de hidrógeno.

3.3.3 Hidrógeno líquido como combustible.

El uso de hidrógeno líquido ha sido estudiado por diversos autores en la literatura [White y Steeper, 2000]. En los motores que usan este combustible se almacena el hidrógeno en forma líquida y se inyecta en forma gaseosa. Para esto se requiere de un contenedor criogénico que permita mantener el hidrógeno en este estado, a una temperatura de aproximadamente 20 K [BMW, 2007].

Su beneficio primario es la alta densidad energética del combustible, que es de aproximadamente 120 MJ/kg [Sørensen, 2005], que supera a la de la gasolina. Otra de sus ventajas se refiere al enfriamiento del motor, ya que la baja temperatura a la que es inyectado el combustible, a pesar de estar ya en estado gaseoso, puede inhibir el aumento excesivo de la temperatura en ciertas regiones del motor, tales como la bujía, los inyectores y algunas regiones de la cámara de combustión.

3.4 Un método para controlar la temperatura del cilindro

Con el propósito de controlar las pérdidas por enfriamiento y el sobrecalentamiento de la cámara de combustión, se propuso un método usado en la literatura [Trenc et al., 1998], para aplicarlo a los motores de combustión interna alimentados con hidrógeno, el cual consiste en diseñar un canal rectangular curvilíneo en la parte superior del cilindro, es decir, en la zona de la cabeza, a través del cual se hace pasar aceite lubricante, a determinada velocidad, que propicie una adecuada transferencia de calor entre los gases de combustión, el material del cilindro y el mismo aceite, teniendo así un mejor control sobre la temperatura de las paredes de la cámara de combustión, lo cual, a su vez, contribuye a evitar los fenómenos anormales de la combustión y a incrementar la eficiencia del motor. La disposición de dicho canal se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.4. Dibujo del cilindro de un motor con un canal en la parte superior, por el cual se hace pasar aceite lubricante [Trenc et al., 1998].

Las restricciones del problema son las siguientes:

1. Se tiene un flujo laminar completamente desarrollado en el canal.
2. Se tiene una velocidad constante.
3. El fluido se encuentra a una misma temperatura en todos sus puntos, de manera constante.
4. Se considera un fluido Newtoniano.
5. Se tiene un canal rectangular de dimensiones 1x37mm [Trenc et al., 1998].

Para la reacción de combustión, se consideró una mezcla estequiométrica de aire/hidrógeno y una ignición al momento en que el pistón se encuentra en el punto muerto superior, es decir, a cero grados de ángulo Crank.

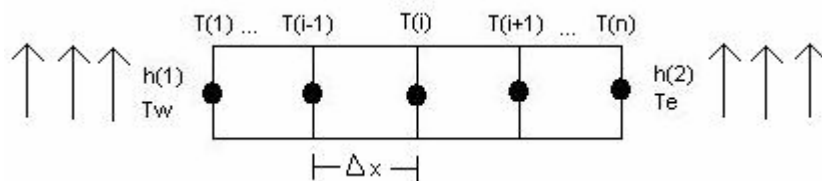


Figura 3.5. Sección lateral de la pared del cilindro de un motor, con dos fronteras de convección. Del lado derecho se tiene el flujo de los gases de combustión y del izquierdo el flujo del aceite lubricante.

Para esto se halló la solución numérica de la Ecuación 3.2, con dos fronteras de convección, como se muestra en la Figura 3.5. La primera frontera se refiere a aquella que entra en contacto con el aceite lubricante, mientras que la segunda se refiere a la que está en contacto con los gases de combustión. El TDMA se aplicó al escribir un código en el lenguaje de programación del paquete

Compaq Visual Fortran 6.6, que mostrara la distribución de temperaturas a lo largo de una sección en la pared del cilindro durante los dos últimos procesos de expansión y compresión (explosión y escape), realizados por el pistón en un ciclo. Esto permitió conocer el coeficiente de transferencia de calor h que debe tener el aceite para poder ofrecer un buen control de la temperatura, permitiendo así conocer también la velocidad a la que debe fluir el aceite, fin último de este método, a través de las ecuaciones de los números adimensionales para el flujo laminar completamente desarrollado, que se describen a continuación. El coeficiente h es útil para encontrar el número de Nusselt en canales no circulares y se relacionan como sigue:

$$Nu = \frac{hD_h}{k}, \quad (3.14)$$

donde D_h es el diámetro hidráulico, definido como $4A_c/P$, en el que A_c es el área transversal del canal por donde fluye el aceite y P es el perímetro que está con contacto con el fluido. Nu es el número de Nusselt. La relación Dittus-Boelter [Veersteg y Malalasekera, 1995] para flujo laminar relaciona los números adimensionales de la siguiente manera:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n, \quad (3.15)$$

donde Re es el número de Reynolds, Pr , el número de Prandtl y n es igual a 0.4 o 0.3, si la temperatura de la pared es mayor que la del fluido o viceversa, respectivamente. Además, el número de Reynolds se puede relacionar con la velocidad del fluido de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho u_m D_h}{\mu}, \quad (3.16)$$

donde ρ es la densidad del fluido, u_m es la velocidad promedio y μ es la viscosidad dinámica [Incropera y DeWitt, 1996].

3.4.1 Solución de la ecuación de transferencia de calor

La Ecuación 3.2 en su forma algebraica, para el nodo Oeste de la Figura 3.5, situado en la frontera del material que está en contacto con el aceite lubricante, se expresa así:

$$\frac{k(T_2^1 - T_1^1)}{\Delta x} - h_1(T_1^1 - T_w) = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}(T_1^1 - T_1^0), \quad (3.17)$$

donde T_w es la temperatura del aceite lubricante, Δt es el intervalo de tiempo que se elige, c es el calor específico del material (en este caso, aleación de aluminio) y los superíndices 1 y 0 se refieren a las temperaturas de la pared antes y al término del intervalo de tiempo. La ecuación queda expresada para usar el TDMA, de la siguiente manera:

$$rT_2^1 - (r + h_1 + a_p)T_1^1 = -a_p T_1^0 - h_1 T_w, \quad (3.18)$$

donde $r = k/\Delta x$ y $a_p = \rho c \Delta x / \Delta t$. De manera similar, la ecuación para la frontera Este queda como sigue:

$$rT_{n-1}^1 - (r + h_2 + a_p)T_n^1 = -a_p T_n^0 - h_2 T_e, \quad (3.19)$$

donde T_e es la temperatura de los gases de combustión. Para el caso del resto de los nodos, los que se encuentran entre las fronteras, la forma algebraica se escribe:

$$\frac{k(T_{i+1}^1 - T_i^1)}{\Delta x} - \frac{k(T_i^1 - T_{i-1}^1)}{\Delta x} = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}(T_i^1 - T_i^0). \quad (3.20)$$

Quedando, para usar el TDMA, como sigue:

$$rT_{i-1}^1 - (2r + a_p)T_i^1 + rT_{i+1}^1 = -a_p T_i^0. \quad (3.21)$$

3.4.2 Resultados

Los coeficientes de transferencia de calor de los gases de combustión se tomaron de aquéllos obtenidos en la literatura [Shudo y Suzuki, 2002]. Durante el proceso de expansión, se tiene un coeficiente h de transferencia de calor de $800 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y una temperatura máxima alcanzada de 2000 K [Shudo, Nabetani y Nakajima, 2001], para los gases de combustión, y se supone una temperatura inicial promedio en las paredes del cilindro de 473 K . Asimismo, se considera un

tiempo de 0.02s, que corresponde a una velocidad de motor de 1500rpm. El material con el que se considera está hecha la cabeza del cilindro es una aleación de aluminio, la cual presenta una densidad de 2700kg/m^3 , conductividad térmica k de 150W/m K y una capacidad calorífica de 897J/kg K [Stone, 1999]; dichas propiedades se consideran constantes a durante los dos procesos mencionados. Además, se consideró una distancia de 0.01m entre los gases de combustión y el aceite lubricante.

Al cabo del proceso de expansión, se obtiene un mapa de temperaturas en la pared del cilindro que se usa como el mapa inicial para el proceso de compresión, en el que se expulsan los gases de escape de la cámara de combustión, los cuales se encuentran a una temperatura de 425K [Shudo, 2007]. En este proceso, de igual duración que el anterior, se toma un coeficiente h de transferencia de calor de $200\text{W/m}^2\text{ K}$.

Es necesario conocer las condiciones iniciales de la temperatura para el proceso de compresión, ya que es a través de ellas que se obtienen las temperaturas de la pared al final del proceso, las cuales deben estar por debajo de la temperatura de autoignición del hidrógeno, que es de 858K, como se puede observar en la Tabla 3.1. Para lograr que las temperaturas se mantengan por debajo de dicho valor, se corrió el programa con diferentes valores del coeficiente de transferencia de calor del aceite lubricante.

En la Figura 3.6 se muestra la gráfica de la distribución de temperaturas en una sección lateral de la pared del cilindro, al final de la carrera de expansión, la cual dura 0.02s. En ella se puede observar que la pared alcanza una temperatura promedio de 1035.5K, la cual sirvió como temperatura inicial para la siguiente ejecución del programa, que corresponde a la carrera de compresión, en la que se expulsan los gases de escape del cilindro.

En la Figura 3.7 se muestra la gráfica de la distribución de temperaturas en la misma sección, pero para el proceso de compresión. Se tomó el promedio de las temperaturas anteriores para hacer el cálculo de la siguiente distribución. En la gráfica se observa una distribución no lineal, ya que las temperaturas mayores se encuentran a la mitad de la longitud total de la sección, siendo los extremos de la misma, los menos calientes. Se han colocado las distribuciones a 0.01s y 0.02s, ya que, a diferencia de la Figura 3.6, es visible la evolución de las temperaturas. La temperatura más alta se encuentra por debajo de los 552K, lo cual es inferior al valor para la

autoignición del hidrógeno y cumple con los requerimientos para evitar el sobrecalentamiento de las paredes del cilindro. Además, el rango de temperaturas a lo largo de la sección es menor.

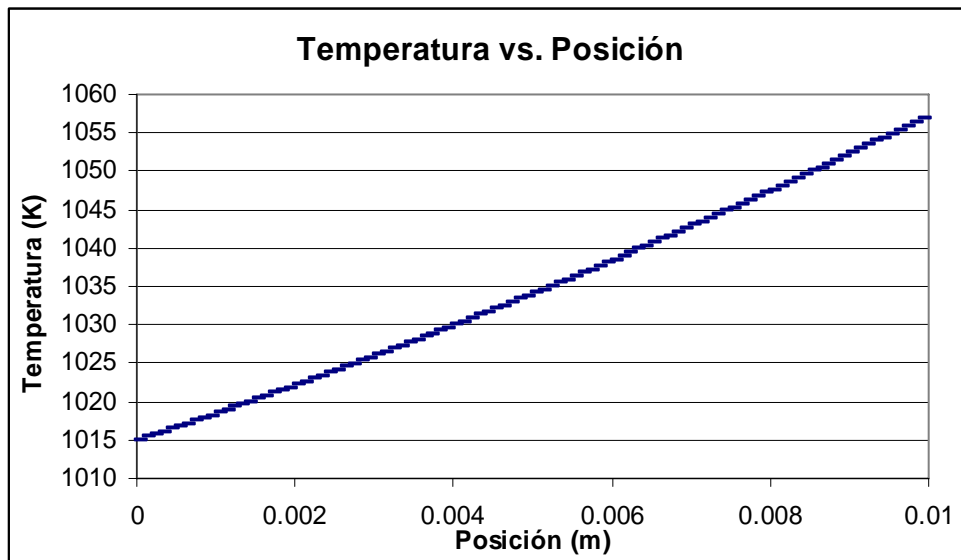


Figura 3.6. Gráfica de la distribución de temperaturas a lo largo de una sección de la pared del cilindro, durante el proceso de expansión.

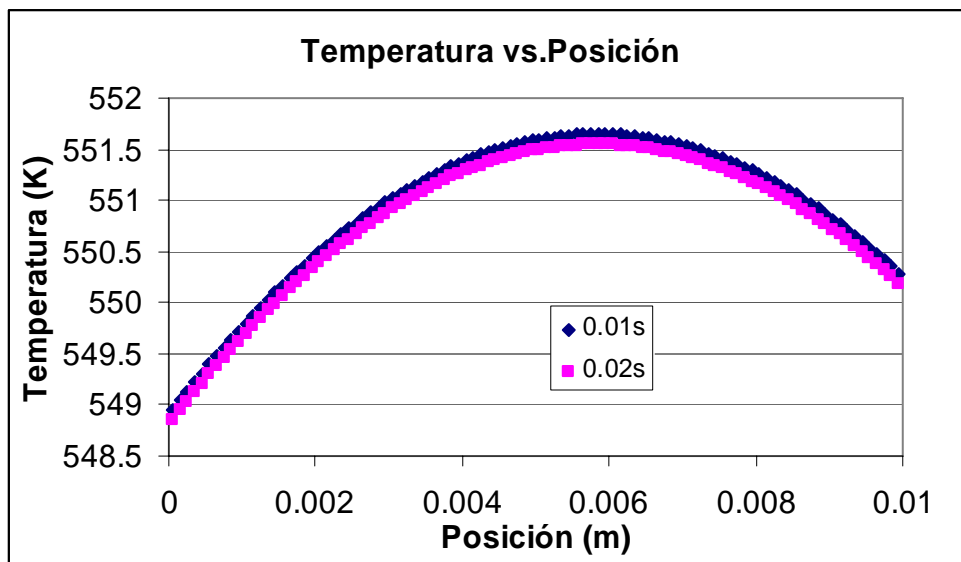


Figura 3.7. Gráfica de la distribución de temperaturas a lo largo de una sección de la pared del cilindro, durante el proceso de compresión.

El coeficiente de transferencia que se determinó como el más adecuado para el aceite lubricante fue de $800\text{W/m}^2\text{K}$, el cual resultó poder controlar la temperatura en la pared del cilindro, entre los rangos más aceptables mencionados en la literatura. Utilizando las Ecuaciones

3.14 a la 3.16, se puede calcular la velocidad u_m a la que se logran los resultados mostrados en las Figuras 3.6 y 3.7, utilizando los datos de la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propiedades térmicas de aceite de motor sin usar [Universidad de Buenos Aires, 2008].

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m ³)	840
Conductividad térmica (W/m K)	0.137
Viscosidad dinámica (N s/m ²)	0.0171
Diámetro hidráulico (m)	0.002
Número de Prandtl	276

Tomando en cuenta los datos anteriores se tiene como resultado una velocidad promedio u_m con un valor de 2.97m/s.

El método mencionado anteriormente es una aproximación para el flujo de aceite lubricante en un canal rectangular, con propósitos de control de la temperatura para un cilindro de un motor de combustión interna alimentado con hidrógeno. Es posible aumentar los alcances de esta propuesta, a través de la experimentación y la búsqueda de restricciones que se acerquen más a la realidad, ya que las consideraciones aquí tomadas son para un ciclo ideal, sin tomar en cuenta factores como la fricción, la eficiencia volumétrica, los cambios en los tiempos de chispa e inyección, entre otros.

Bajo estas condiciones se ha encontrado el mejor coeficiente h del lubricante, corresponde a los parámetros de diseño con temperaturas de pared alrededor de los 550K, mencionados en la literatura [Shudo, Nabetani y Nakajima, 2001]. Además de los resultados anteriormente mencionados, se procedió a correr de nuevo el programa con el propósito de encontrar el límite inferior del coeficiente de transferencia del aceite que pueda controlar la temperatura, justo antes del valor de ésta para la autoignición. El coeficiente de transferencia, para que la pared se encuentre a una temperatura aproximada de 830K, es de 350W/m² K, que corresponde a una velocidad del fluido de 1.06m/s; es decir, para que la pared se encuentre por debajo de la temperatura de autoignición, es necesario tener una velocidad promedio del flujo mayor a 1.06 m/s. Sin embargo, la temperatura de pared más adecuada ya se ha establecido en la literatura y es

el nivel al que debe permanecer la pared del cilindro, procurando evitar así los fenómenos anormales de la combustión.

3.5 Conclusiones

Se pueden resolver problemas de transferencia de calor por métodos iterativos para establecer una distribución de temperaturas en la cámara de combustión usando la herramienta de la simulación, a partir del calor generado por la reacción de combustión del hidrógeno. Es posible desarrollar mucho más trabajo de investigación en este sentido, para poder diseñar mejores técnicas de control del sobrecalentamiento en motores de combustión interna alimentados con hidrógeno.

Los cálculos de las pérdidas por enfriamiento pueden dar información sobre las variables que se pueden manipular en un motor para reducir dichas pérdidas, aumentando así la eficiencia y la salida del motor, y reduciendo las emisiones. Es por esto que la revisión técnica sobre los cálculos hechos por diversos autores contribuye a dar continuidad a sus investigaciones, para trabajar con ellos de manera experimental.

Además de los cálculos teóricos y las simulaciones, se pueden usar técnicas ya probadas para controlar la temperatura, tales como el enfriamiento de las bujías, los inyectores y las válvulas de admisión, dispositivos cercanos a la cámara de combustión y que, por la misma razón, tienden a ser zonas de calentamiento excesivo. Dicho control se puede lograr haciendo pasar el líquido refrigerante por aquellas zonas y las regiones superiores del cilindro.

En particular, el uso de sensores de temperatura, como termopares, puede ser útil en la medición de temperatura en las zonas más calientes de la superficie externa de la cámara de combustión, entre otras. De esta manera, se pueden obtener datos para las condiciones de frontera en un programa de cálculo de distribución de temperaturas en un sistema bidimensional, mediante la solución de la ecuación del flujo de calor en estado transitorio (3.2), por el método de diferencias finitas. En este sentido se pueden desarrollar técnicas y herramientas computacionales cada vez más exactas en el cálculo de la transferencia de calor y la distribución de temperaturas a lo largo de las distintas zonas del motor que son más propensas al sobrecalentamiento, así como programas de simulación sobre los procesos de combustión que se dan en los cilindros.

Tabla 3.2 Especificaciones técnicas de factibilidad para el sistema de enfriamiento de un motor de combustión interna que use hidrógeno como combustible.

Tipo de motor	Técnica a aplicar	Adaptación que se sugiere	Metodología experimental
Ignición por chispa	<u>En motores que utilizan hidrógeno gaseoso</u> , se sugiere el sistema de enfriamiento basado en líquidos de alta viscosidad, tales como aceites lubricantes.	Se sugiere que dicho sistema de enfriamiento este en mayor contacto con la parte superior del cilindro, así como en las vecindades de la bujía, la boquilla del inyector y las válvulas de admisión.	Basados en el estudio de la transferencia de calor en la cámara de combustión, se establecerán las condiciones de frontera para la solución de la ecuación de difusión de calor, mediante métodos iterativos, verificándolos experimentalmente.
	<u>En motores que utilizan hidrógeno líquido</u> , debido a que el hidrogeno se encuentra a una temperatura de 20K, se recomienda el uso de un sistema tradicional de enfriamiento, cuidando que la temperatura excesivamente baja no afecte el desempeño del motor.	Se sugiere aislantes térmicos en los diferentes conductos del sistema de suministro e inyección, para evitar la condensación de vapor de agua, que pueda afectar de manera negativa el funcionamiento de ese sistema.	Realizar un estudio de la implementación de diversos sistemas de aislantes térmicos a baja temperatura, tales como aluminio, fibras de carbono o fibras de vidrio, que existen en el mercado.
Ignición por compresión	Se sugiere el sistema de enfriamiento basado en líquidos de alta viscosidad, tales como aceites lubricantes, similar al tratado en los motores de ignición por chispa.	Se sugiere la disposición de canales en la superficie externa del cilindro, por los cuales pueda pasar el líquido enfriador, haciendo contacto principalmente con la parte superior del cilindro, además de aquellos señalados en los motores de ignición por chispa que usan hidrógeno gaseoso como combustible.	Basados en el estudio de la transferencia de calor en la cámara de combustión, se establecerán las condiciones de frontera para la solución de la ecuación de difusión de calor, mediante métodos iterativos, verificándolos experimentalmente.

En la Tabla 3.2 se presentan algunas de las condiciones de factibilidad para el uso del hidrógeno como combustible, en cuanto al sistema de enfriamiento se refiere, como resultado de la investigación realizada.

El hidrógeno líquido, además de ser un combustible con una alta densidad energética, es capaz de enfriar los diferentes conductos del sistema de alimentación, debido a su baja temperatura de almacenamiento e inyección, a pesar de ser suministrado en estado gaseoso.

Se propuso un método de control de temperatura sugerido en la literatura y se resolvió numéricamente la ecuación del flujo de calor unidimensional en estado transitorio, con dos fronteras de convección, se aplicó el TDMA y se introdujo a un código que hallara la solución de la matriz de ecuaciones a lo largo de la sección de la pared del cilindro de un motor alimentado con hidrógeno. Se encontró que el coeficiente de transferencia óptimo es de $800\text{W/m}^2\text{ K}$, el cual corresponde a una velocidad promedio del flujo de 2.97m/s , manteniendo una temperatura de aproximadamente 550K , valor recomendado también en la literatura y que se encuentra por debajo de la temperatura de autoignición del hidrógeno, contribuyendo a evitar los fenómenos anormales de la combustión.

3.6 Referencias

- Font, J., Dols, J. Tratado sobre automóviles (Grupo Editor Alfaomega, México, D. F., 2004).
- Heywood, J. Internal combustion engine fundamentals (Mc Graw Hill, Nueva York, 1989).
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P. Fundamentals of heat and mass transfer (4a ed., Wiley, Nueva York, 2006).
- Shudo, T. Improving thermal efficiency by reducing cooling losses in hydrogen combustion engines, International Journal of Hydrogen Energy **32** (2007) 4285-4293.

- Shudo, T., Nabetani, S., Nakajima, Y. Analysis of the degree of constant volume and cooling loss in a spark ignition engine fuelled with hydrogen, *International Journal of Engine Research* **2** (2001) 81-92.
- Shudo, T., Suzuki H. Applicability of heat transfer equations to hydrogen combustion. *JSAE Review* **23** (2002) 303-308.
- Shudo, T., Suzuki H. New heat transfer equation to hydrogen combustion engines, *Proceedings of ASME Fall ICE, New Orleans* **39** (2002) 335-341.
- Sørensen, B. *Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications* (Elsevier Academic Press, Amsterdam, 2005).
- Stone, R. *Introduction to internal combustion engines* (3a ed., Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, 1999).
- Trenc, F., Rodman, S., Skerget, L., Delic, M. Optimum cylinder cooling for advanced diesel engines, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **120** (1998) 657-663.
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method* (Wiley, Nueva York, 1995).
- White, C. M., Steeper R. R., Lutz A. E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical Review, *International Journal of Hydrogen Energy* **31** (2006) 1292-1305.
- www.bmw.com
- <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla7.pdf>

CAPÍTULO IV

MEZCLAS DE GAS/HIDRÓGENO

Resumen

La combustión de la mezcla aire-combustible dentro del cilindro del motor es uno de los procesos que controlan la potencia, eficiencia y emisiones del mismo. Por eso es necesario establecer una base de los aspectos relevantes sobre el fenómeno de la combustión para entender la operación del motor.

En el presente capítulo se tratan algunos puntos importantes del fenómeno de la combustión. Posteriormente se aborda el tema de la combustión de hidrocarburos, con sus implicaciones energéticas, y se comparará con la del hidrógeno, estableciendo sus ventajas y desventajas.

Como punto principal, se reporta la revisión técnica hecha de las investigaciones más recientes en materia de las diferentes mezclas de gas/hidrógeno que se encuentran actualmente en la literatura. Con ello se pretende dar un marco de referencia para la implementación de un motor de combustión interna que use hidrógeno como combustible, así como dar la pauta para futuros avances en materia de combustión de hidrógeno.

4.1 Termodinámica química

4.1.1 Entalpías de formación y valores caloríficos

La entalpía de formación $\Delta\tilde{h}_f^\circ$ de un compuesto químico es el incremento de la entalpía asociado con la reacción de formación de un mol del compuesto dado a partir de sus elementos, con cada sustancia en su estado termodinámico estándar a una temperatura dada.

Para los combustibles de componentes netamente hidrocarburos, o donde se conoce la composición precisa, las energías internas o entalpías de los reactantes y los productos se pueden

relacionar a través de sus entalpías de formación. Para los combustibles en los que la composición precisa no es conocida, la entalpía de los reactantes no puede ser determinada de las entalpías de formación de las especies reactantes [Heywood, 1989].

Para una reacción de combustión dada, la entalpía de los productos en el estado estándar está dada por

$$H^{\circ}_P = \sum_{\text{productos}} n_i \Delta \tilde{h}^{\circ}_{f,i} \quad (4.1)$$

y la entalpía de los reactantes está dada por

$$H^{\circ}_R = \sum_{\text{reactantes}} n_i \Delta \tilde{h}^{\circ}_{f,i} \quad (4.2)$$

donde n_i es el número de moles de la i -ésima especie.

El incremento de entalpía $(\Delta H)_{p,T_0}$ se obtiene entonces de la diferencia $(H^{\circ}_P - H^{\circ}_R)$. De lo anterior se puede hallar el incremento de la energía interna, como sigue:

$$(\Delta U)_{V,T} = (\Delta H)_{p,T} - p(V_P - V_R) \quad (4.3)$$

en donde $(\Delta U)_{V,T}$ es el incremento en la energía interna a volumen y temperatura constante, V_P y V_R representan los volúmenes de los productos y de los reactantes, respectivamente.

El valor calorífico Q_{HV} de un combustible es la magnitud del calor de la reacción a presión o volumen constante a condiciones estándar de temperatura (usualmente 25° C) para la combustión completa por unidad de masa de combustible. Este valor se mide directamente cuando no se conoce la composición precisa del combustible. Usualmente este valor se expresa en joules por kilogramo [Heywood, 1989; Stone, 1999]. Algunos autores reconocen el valor calorífico como calor de combustión [Obert, 1968]. Es importante conocer este valor porque permite medir la eficiencia de combustión de una mezcla, medida que se mencionó en el Capítulo 3 y que resulta determinante para el cálculo de la eficiencia térmica en un motor de combustión interna.

4.2 Cinética química de las reacciones de combustión

La cinética química es una herramienta que sirve para estudiar aquellas mezclas que son capaces de reaccionar lo suficientemente rápido como para hacer explosión. Es por esto que su estudio es necesario para poder determinar la rapidez de reacción de la combustión que se da en los motores de combustión interna. Esta rapidez depende en gran medida de las concentraciones de las especies y la temperatura de la mezcla. Una expresión fundamental para determinar la rapidez con la que se van consumiendo los productos en una reacción de combustión es la ley de acción de masas, la cual establece que la relación de desaparición de una especie química, es proporcional al producto de las concentraciones de las especies reactantes, cada una elevada a su correspondiente coeficiente estequiométrico. En la literatura se puede encontrar la ecuación que expresa esta ley [Glassman, 1987].

4.2.1 Velocidades de reacción

Las velocidades de muchas reacciones dependen en gran medida de las interacciones entre dos especies que pueden tener la capacidad de reaccionar. Estas reacciones se conocen como de segundo orden. En cambio, las reacciones de primer orden son dominadas por una etapa en la cual se rompen los enlaces libres, característica que se da en las reacciones de descomposición e isomerización, mayormente [Glassman, 1987; Kuo, 1986]. La constante de rapidez de reacción depende de la temperatura y es independiente de las concentraciones de las especies reactantes [Glassman, 1987].

4.2.2 Reacciones en cadena

Las reacciones en cadena son el tipo más común de reacciones químicas. Consisten en una serie de etapas de reacciones consecutivas, competitivas y opuestas con diferentes constantes de velocidad. Dichas reacciones complejas ocurren en todas las reacciones de combustión.

En un proceso de reacción, las especies más activas se conocen como radicales libres, los cuales se caracterizan por tener electrones sin enlace. En la reacción de combustión del hidrógeno (la cual también es una reacción en cadena) se liberan mucho radicales libres, durante las diferentes etapas de la reacción.

Las reacciones elementales se conocen como de inicio o de término, si crean o destruyen radicales libres, respectivamente. Además, las reacciones que se encuentran entre estas dos últimas se conocen como de propagación, si el número de radicales es igual en los productos y en los reactantes, y de ramificación, si es mayor en los productos que en los reactantes [Kuo, 1986].

4.3 Combustión de mezclas de hidrocarburos

La flama se clasifica generalmente de acuerdo a ciertas características generales. La primera de ellas tiene que ver con la composición con la que entran los reactantes a la zona de reacción. Si el combustible y el oxidante se mezclan uniformemente, la flama es designada como *premezclada*. Si los reactantes no son premezclados y se deben mezclar juntos en el lugar donde se da la reacción, la flama es designada como de *difusión*, debido a que la mezcla viene acompañada de un proceso de difusión. El segundo tipo de clasificación de la flama se refiere a las características del flujo del gas a través de la zona de reacción: *laminar* o *turbulento*. En la flama laminar, el transporte y la mezcla del flujo del gas se deben a procesos moleculares o, en otras palabras, a bajos números de Reynolds, los cuales se definen como la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas. En la flama turbulenta, el transporte y la mezcla del flujo del gas son provocados por el movimiento relativo macroscópico de masas de fluido, es decir, números de Reynolds altos. Una tercera área de clasificación se refiere a si la flama es *estable* o *inestable*. La característica que las distingue es si la estructura de la flama y el movimiento cambian con el tiempo. En general, la flama en una máquina de combustión interna es inestable [Heywood, 1989].

4.3.1 Composición del aire

En los motores, normalmente los combustibles son mezclados con aire atmosférico, el cual está compuesto de un 20.95% de oxígeno, 78.09 de nitrógeno, 0.93% de argón, y pequeñas cantidades de dióxido de carbono, neón, helio, metano y otros gases. El nitrógeno y los demás gases simplemente diluyen la concentración de oxígeno y usualmente aparecen en los productos de manera inalterada. Para los propósitos del presente trabajo consideraremos que el aire se compone de un 21% de oxígeno y un 79% de nitrógeno [Heywood, 1989; Stone, 1999; Obert, 1968]. El peso molecular del aire es obtenido de la siguiente fórmula:

$$M = \frac{1}{n} \sum_i n_i M_i \quad (4.6)$$

De esta manera se puede calcular el peso molecular del aire, el cual se considerará como de 28.96.

4.3.2 Combustión estequiométrica

La molécula octano contiene casi un 84% de carbono y un 16% de hidrógeno. La combustión estequiométrica de dicha molécula viene representada por la siguiente ecuación, ya balanceada:



Las mezclas aire/combustible con diferente cantidad de aire al requerimiento estequiométrico pueden hacer combustión. En una combustión con exceso de aire, o mezcla ligera, dicho exceso aparece en los productos en forma inalterada. Con una cantidad menor al requerimiento de aire, o mezcla rica en combustible, no hay oxígeno suficiente para oxidar todo el carbono y el hidrógeno en dióxido de carbono y agua, que son los productos de la combustión, junto con monóxido de carbono e hidrógeno.

La relación aire combustible (AFR) de una mezcla estequiométrica se puede calcular a partir del peso molecular del aire, dividido por el peso molecular del octano, en las proporciones que se muestran en la Ecuación (4.33a), quedando como

$$AFR = \frac{\text{Peso - aire}}{\text{Peso - combustible}} \quad (4.7b)$$

$$AFR = \frac{(12.5 + 46.25) * 29}{8 * 12 + 18 * 1} \quad (4.7c)$$

$$AFR = 14.95 \text{ gr}_{\text{aire}} / \text{gr}_{\text{combustible}} \quad (4.7d)$$

Esto quiere decir que, para obtener una mezcla estequiométrica en una cámara de combustión, se tienen 14.95 gramos de aire por cada gramo de combustible. Para este ejemplo se toma la

molécula octano como referencia, sin embargo, combustibles como la gasolina tienen pesos moleculares diferentes, por lo que lo anterior se considera sólo una aproximación.

Debido a que la composición de los productos de combustión es diferente cuando se habla de mezclas ligeras o ricas, y debido a que la relación estequiométrica aire/combustible depende de la composición del combustible, se designa ϕ como la relación o índice de equivalencia, que es el cociente de la relación estequiométrica aire/combustible y la relación real [Heywood, 1989], es decir:

$$\phi = \frac{(F/A)_{actual}}{(F/A)_s} \quad (4.8)$$

donde F indica la cantidad de combustible y A , la cantidad de aire.

El inverso de ϕ es la relación relativa aire/combustible λ . Una relación de equivalencia menor a 1 se considera como de una mezcla ligera, mientras que una mayor a 1 se considera como rica. La relación de equivalencia que es igual a 1 corresponde a una mezcla estequiométrica. En general, las cargas ultraligeras son aquellas cuya relación de equivalencia es menor a 0.5. Dicho valor se puede expresar de manera gravimétrica o molar, pero generalmente se usa la primera forma.

Los límites de flamabilidad son aquellos entre los cuales se puede tener una reacción de combustión en una mezcla aire/combustible, desde una relación ultraligera a una rica. Se puede expresar en términos de porcentaje o de la relación de equivalencia.

En la Tabla 4.1 se pueden observar los límites de flamabilidad de algunos combustibles. El de la gasolina en el aire se encuentran en las mezclas que contienen este combustible en un porcentaje del 1.0 al 7.6% o, en términos de la relación de equivalencia, de 0.7 a 4 [White y Steeper, 2006; Sørensen, 2005].

Tabla 4.1. Rango de flamabilidad de algunos combustibles [Sørensen, 2005; White et al., 2006].

Combustible	Rango de Flamabilidad en Aire (%)
Hidrógeno	4-75
Gasolina	1.0-7.6
Metano	5-15
Metanol	7-36
Propano	2.5-9.3
Gas natural comprimido	4.3-15.0

4.3.3 Emisiones y oxidación de hidrocarburos

Óxidos nitrosos

Tanto al óxido nítrico (NO) como al dióxido de nitrógeno (NO₂) se les conoce como óxidos nitrosos (NO_x). El óxido nítrico es, generalmente, el óxido nitroso dominante formado durante la combustión. Sin embargo, la oxidación posterior produce emisiones de dióxido de nitrógeno, las cuales, al entrar en contacto con la luz ultra violeta, reaccionan con el resto de los hidrocarburos, excepto el metano, produciendo contaminación fotoquímica. En base a las emisiones calculadas se supone que todo el óxido nítrico se oxida y se convierte en dióxido de nitrógeno [Stone, 1999].

El óxido nítrico se forma en la flama a través de tres mecanismos: térmico, rápido y a través del óxido nitroso. El primero de ellos se basa en el mecanismo extendido de Zeldovich [Stone, 1999]:



Las Ecuaciones (4.9) y (4.10) fueron identificadas por Zeldovich (1946) y la Ecuación (4.11) fue añadida por Lavoie y colaboradores (1970), a través de medios espectroscópicos. Las constantes de velocidad para el mecanismo térmico son muy lentas en comparación con las de la combustión y la formación de NO sólo es significativa cuando hay una temperatura suficientemente alta y

suficiente tiempo. Por lo tanto, el mecanismo térmico del NO no ocurre en los gases de combustión calientes. Mediciones de la concentración de NO en los gases quemados no se extrapolan a cero en la flama, lo que indica que es ahí donde se produce NO, debido al mecanismo rápido. Este mecanismo se da cuando hay presencia de nitrógeno en el combustible o cuando la temperatura es demasiado baja como para hacer que el mecanismo térmico sea significativo. El mecanismo rápido es gobernado por



El mecanismo de óxido nitroso es importante a bajas temperaturas y depende de una reacción termo-molecular:



Con la posterior descomposición a óxido nítrico [Stone, 1999].

Monóxido de carbono

Las emisiones de monóxido de carbono (CO) tienden a estar cerca de los valores máximos de presión para mezclas ricas, y cerca de los valores de baja presión para mezclas ligeras. Estas emisiones son resultado de que las velocidades de reacción caigan durante la expansión, por lo que se llega a una temperatura a la cual, la concentración de CO tiende a enfriar. El determinante principal de las emisiones de CO es la relación aire/combustible. Como ejemplo, supóngase un motor de dos cilindros operando principalmente a mezcla estequiométrica:

1. Ambos cilindros, a carga estequiométrica, con una emisión de CO de 0.84%.
2. Cada cilindro operando con una diferencia porcentual de 5 de la mezcla estequiométrica (una abajo, la otra arriba). El escape será de un 1.06% de CO, nivel comparable al de CO en equilibrio, a máxima presión.

Por lo tanto, para la operación estequiométrica, la mala distribución de la mezcla en el cilindro y la variación en la relación aire combustible, tienen una influencia determinante en la emisión de CO [Stone, 1999; Heywood, 1989].

4.4 Combustión de Mezclas Aire/Hidrógeno

Una de las ventajas que presenta el hidrógeno como combustible es el amplio rango de flamabilidad (Tabla 4.1), porque permite la combustión con índices de equivalencia muy variados. Otra ventaja significativa es la posibilidad de trabajar con mezclas ligeras, lo que hace relativamente fácil echar a andar un motor alimentado con hidrógeno. En la literatura se pueden encontrar trabajos que reportan resultados de la combustión de mezclas aire/hidrógeno a diferentes índices de equivalencia.

Generalmente se obtiene un menor consumo y mejor combustión cuando un motor de combustión interna alimentado con hidrógeno corre a carga ligera, y la temperatura final de la combustión es menor, reduciendo las emisiones contaminantes en los gases de escape. Sin embargo, existe un límite en qué tan ligera puede ser una mezcla, y viene dado por la reducción en la potencia de salida y el valor calorífico de la mezcla.

Las flamas de hidrógeno en aire u oxígeno muestran una radiación muy pequeña que se puede observar gracias a la presencia de impurezas. Cantidades considerables de OH se detectan en la región ultravioleta del espectro.

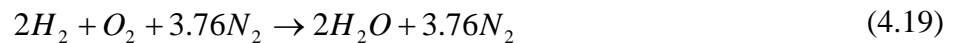
Se ha observado que bajo condiciones ambientales de temperatura, el hidrógeno y el oxígeno no entran en reacción directa en ausencia de un catalizador [Das, 1995]. Posteriormente se observó que las mezclas de hidrógeno y oxígeno se activan cuando entran en contacto con oxígeno ligero, mediante la vía de la disociación.

4.4.1 Reacción de Combustión

Un ejemplo típico de la explosión en cadena ramificada de una mezcla hidrógeno-oxígeno se expresa de la siguiente manera [Das, 1996]:



La combustión teórica del hidrógeno y el aire está dada por la ecuación química



Esto implica una relación estequiométrica aire/combustible de 34:1 (34 gramos de aire por cada gramo de hidrógeno), haciendo un procedimiento semejante como en las Ecuaciones (4.33b), (4.33c) y (4.33d). Para esta relación, la fracción de volumen de hidrógeno que ocupa la cámara de combustión es de aproximadamente 30%, mayor que con gasolina que ocupa un 1% [Heffel, 2003]. En una combustión real, el dióxido de carbono y los óxidos nitrosos también forman parte de los productos, y se dan debido a la combustión incompleta y a la presencia de otros elementos en el sistema al momento de darse la reacción.

4.4.2 Fenómenos de Combustión Anormal

Existen tres tipos de combustión anormal:

- i) Elevación anormal de la presión.
- ii) Preignición en la cámara de combustión y un avance secuencial de la preignición y retroceso de flama en el múltiple de admisión.
- iii) Retroceso de flama ocasional en mezclas ligeras de aire/hidrógeno.

El retroceso de la flama ha sido el obstáculo más importante en el desarrollo del motor de hidrógeno, pero se presenta tanto en motores de este tipo como en los de gasolina. Ocurre cuando la carga de aire-combustible se inicia durante el ciclo de entrada, dando como resultado la combustión en el múltiple de entrada. Se puede dar en cualquier motor de hidrógeno que utilice la

aspiración de la carga premezclada, particularmente cuando se intenta obtener una mayor potencia de salida. Toma lugar cuando la mezcla de entrada entra en contacto con alguna fuente térmica con la suficiente energía como para iniciar la combustión durante el periodo en el cual la válvula está abierta. Es la combustión más difícil de controlar [Das, 1996].

Cuando la válvula está abierta, la carga fresca de hidrógeno y aire entrando al cilindro puede ser iniciada por fuentes de calor antes de ser iniciada por la chispa. Este es un proceso de preignición. Si ésta toma lugar de manera frecuente, el retroceso de flama aparece en el múltiple de entrada. Aparece cuando la mezcla previa hace que el motor funcione de manera inestable.

La autoignición se da cuando la mezcla no quemada entra en contacto con puntos calientes en la cámara de combustión, ya sea antes o después de la chispa, dando lugar así a otro fenómeno llamado **golpeteo**, el cual es una barrera para el aumento de la eficiencia, la potencia y el uso de combustibles alternativos. Dicho fenómeno consiste en la vibración excesiva de las partes del motor que están en contacto directo con la cámara de combustión, involucrando mayor transferencia de calor a las paredes de la cámara de combustión, aumento excesivo de la presión en el cilindro, temperaturas elevadas y aumento en las emisiones, afectando de manera crítica el desempeño del motor [Li y Karim, 2004].

4.5 Revisión de Motores Alimentados con Hidrógeno

En la literatura se puede encontrar una gran variedad de publicaciones que tratan sobre la combustión de diferentes mezclas de gas/hidrógeno. Tomando en cuenta el objetivo del presente trabajo, se tomaron en cuenta aquellas publicaciones en las que se estudian las diferentes características del desempeño del motor cuando se van cambiando las relaciones de equivalencia de las mezclas, tales como la potencia de salida, la eficiencia del motor y las emisiones.

Asimismo se contemplaron los motores de combustión interna de ignición por compresión y de ignición por chispa. La diferencia entre estos dos últimos motores radica en el hecho de que los de ignición por chispa pueden funcionar con mezclas aire/hidrógeno, mientras que los motores de ignición por compresión requieren de un agente que induzca la combustión, como se verá más adelante.

La combustión de las mezclas aire/hidrógeno presenta únicamente emisiones de dióxido de carbono y óxidos nitrosos. Sin embargo, cuando se mezcla el hidrógeno con otros combustibles convencionales derivados del petróleo, dependiendo del porcentaje que se encuentre en la mezcla, se reducen las emisiones de dichos combustibles.

4.5.1 Hidrógeno y Gas Natural

En la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología se hizo un estudio experimental recientemente, en el que se adaptó un motor de ignición por chispa alimentado originalmente con gas natural (GN), para funcionar con mezclas de este combustible con hidrógeno [Bysveen, 2007]. Se trabajó con un motor de 3 cilindros de 2.7l y una relación de compresión de 11:1. Se colocaron termopares en el múltiple de entrada, el sistema de enfriamiento por agua y en el escape. Se compararon los resultados de las emisiones, eficiencia y potencia de salida, trabajando con dos tipos de composición en el combustible, sin tomar en cuenta el aire: Una solamente con gas natural (99.5% metano) y la segunda con 29% de volumen de hidrógeno. Los tiempos de chispa, medidos en función del ángulo Crank (CA), con los que fueron estudiadas las variables estuvieron en el rango de 5-25° CA antes de llegar al punto muerto superior.

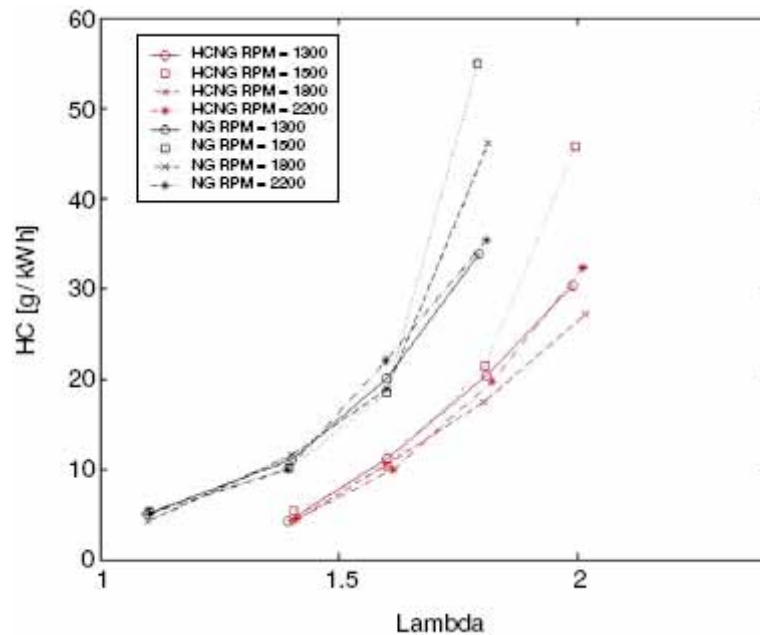


Figura 4.1. Emisiones de hidrocarburos sin quemar contra el índice de exceso de aire lambda λ [Bysveen, 2007].

Algunos de los resultados más importantes de este trabajo, con respecto a las emisiones, se muestran en las Figuras 4.1 y 4.2. La primera de ellas muestra las emisiones de hidrocarburos no quemados de las dos mezclas investigadas: aire/GN y aire/GN/hidrógeno. Se puede observar que al añadir hidrógeno al gas natural, se reduce de manera importante la emisión de hidrocarburos al ambiente. Cuando el exceso de aire λ se encuentra en el rango 1.6-1.8 ppm las emisiones de hidrocarburos en la mezcla aire/GN aumentan de manera significativa, mientras que al añadir hidrógeno este salto sucede en el rango 1.8-2.0 ppm. Con esto se puede entender que el hidrógeno permite trabajar con mezclas más ligeras, sin tener un aumento brusco en las emisiones de hidrocarburos.

En la Figura 4.2 se pueden observar las emisiones de óxidos nitrosos de los dos tipos de mezclas con los que se trabajaron. Las características del hidrógeno hacen que la mezcla tenga mayores velocidad y temperatura de flama, factores que contribuyen al aumento de las emisiones de los óxidos nitrosos. Sin embargo, cuando se trabaja con λ superiores a 1.5, las emisiones se reducen de manera importante, lo cual presenta una gran ventaja al trabajar con mezclas ligeras de hidrógeno.

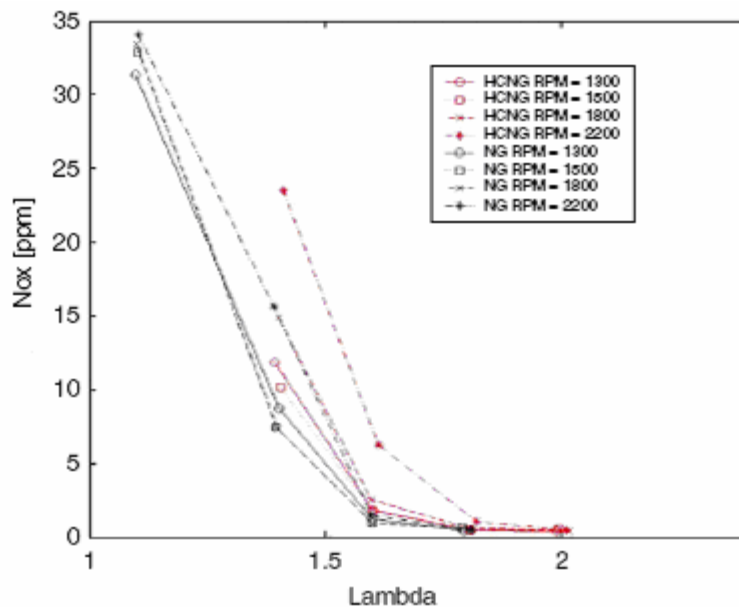


Figura 4.2 Emisiones de óxidos nitrosos contra el índice de exceso de aire lambda λ [Bysveen, 2007].

En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestran las gráficas de los resultados de la evaluación de la potencia del motor y la eficiencia térmica de corte contra el índice de exceso de aire λ . Dichas

figuras muestran un aumento importante en la potencia y la eficiencia del motor, cuando se añade hidrógeno a la mezcla.

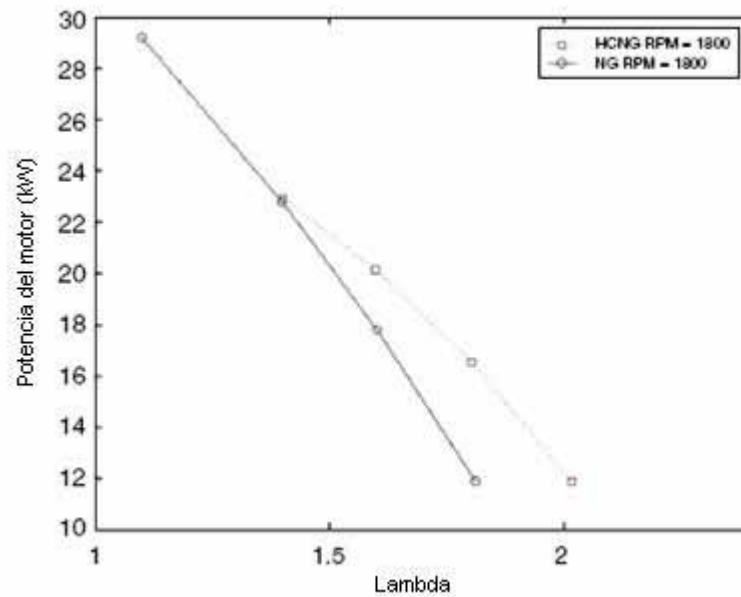


Figura 4.3. Potencia del motor contra el índice de exceso de aire lambda λ [Bysveen, 2007].

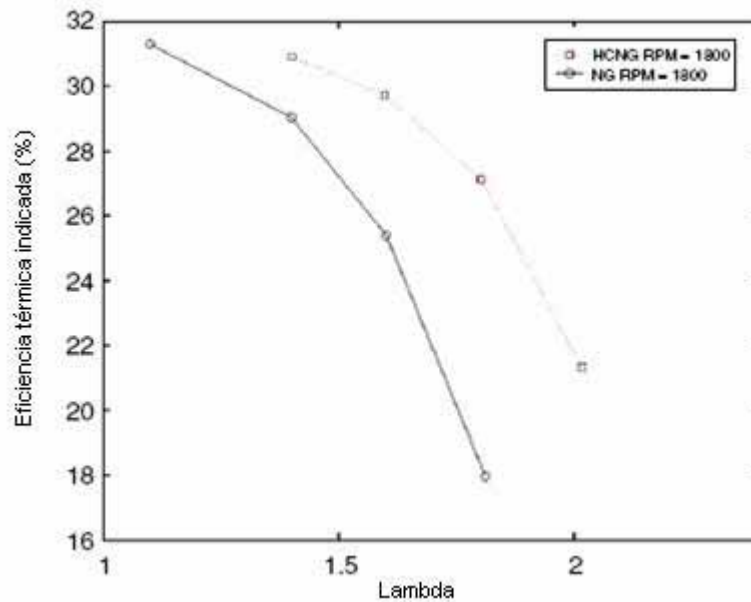


Figura 4.4. Eficiencia térmica de corte contra índice de exceso de aire lambda λ [Bysveen, 2007].

En ambas se puede observar una reducción importante de potencia y eficiencia a la vez que la carga se va haciendo más ligera. Con esto se puede decir que la reducción de emisiones tiene un costo que se ve reflejado en esos dos parámetros. Sin embargo, se observa que las cuatro gráficas

mostradas tienen un punto en común en el que las emisiones no son muy altas, y la potencia y eficiencia del motor no han decrecido en más de un 30% y un 15%, respectivamente. Estos valores se encuentran en $\lambda=1.5$, aproximadamente.

Por otra parte, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Erciyes, en Turquía, se realizó una revisión técnica sobre diversas publicaciones hechas en torno al uso de mezclas GN/hidrógeno a diferentes concentraciones y diferentes tiempos de ignición, en motores de ignición por chispa [Akansu et al., 2004].

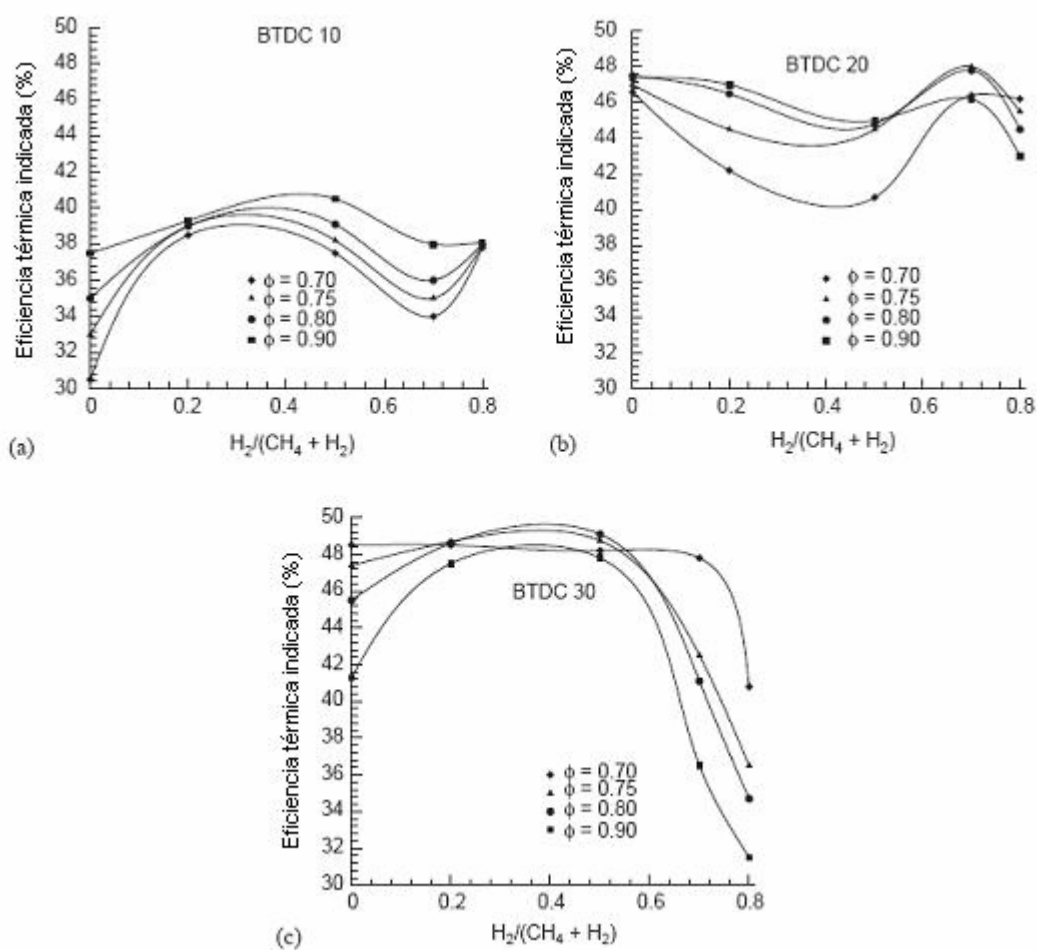


Figura 4.5. Eficiencia térmica indicada contra el porcentaje de hidrógeno presente en la mezcla GN/hidrógeno a diferentes tiempos de ignición: a) BTDC 10, b) BTDC 20, c) BTDC 30 [Akansu et al., 2004].

En la Figura 4.5 se presentan tres gráficas que muestran la variación de la eficiencia térmica indicada a tres diferentes tiempos de ignición que se encuentran antes del punto muerto superior (BTDC, por sus siglas en inglés, en unidades de ángulo Crank). Como se puede observar, la

máxima eficiencia se logra a BTDC 30, siendo ésta de casi un 50%, con una relación de equivalencia ϕ de 0.8 y un porcentaje de 40% de hidrógeno en el combustible.

En cuanto a los gases de escape se reportan emisiones de óxidos nitrosos e hidrocarburos no quemados. En las Figuras 4.6 y 4.7 se muestran las gráficas respectivas. En ellas se pueden observar dos casos: sin convertidor catalítico y con convertidor catalítico.

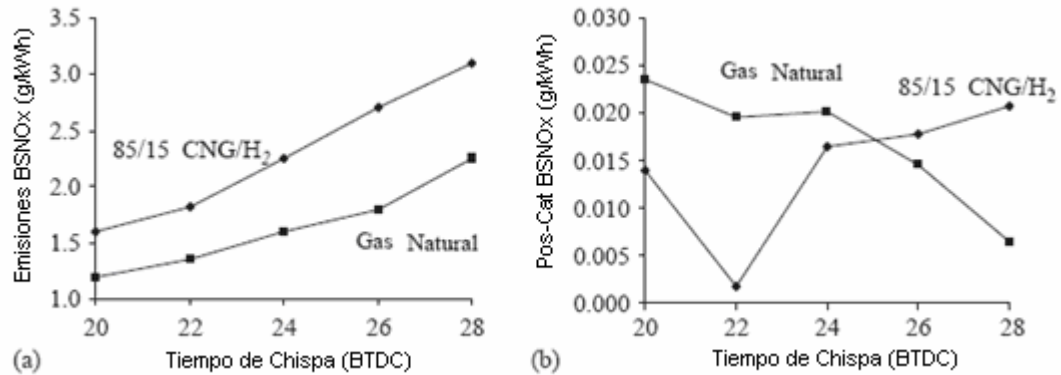


Figura 4.6. Producción específica de corte de óxidos nitrosos (BSNO_x) contra el tiempo de chispa antes del punto muerto superior (BTDC): a) emisión directa, b) con convertidor catalítico [Akansu et al., 2004].

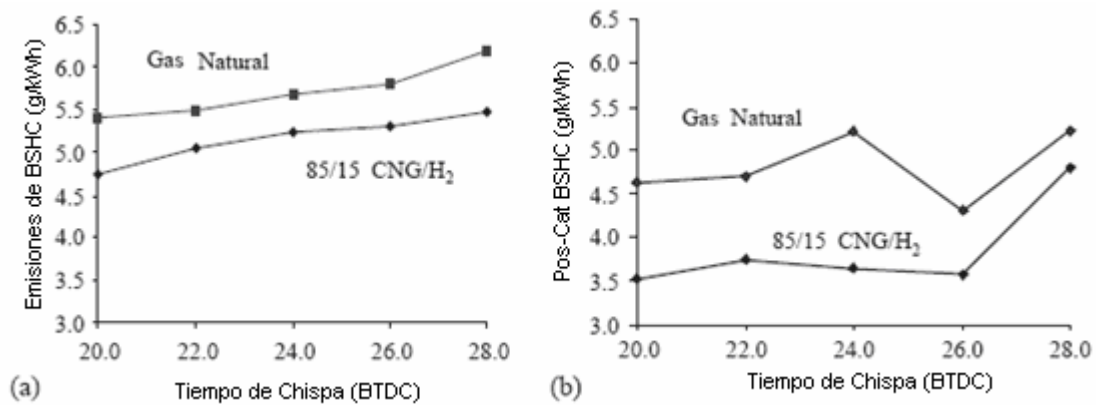


Figura 4.7. Producción específica de corte de hidrocarburos no quemados (BSHC) contra el tiempo de chispa antes del punto muerto superior (BTDC): a) emisión directa, b) con convertidor catalítico [Akansu et al., 2004].

En el caso de la producción de óxidos nitrosos, las cantidades emitidas con GN y con la mezcla GN/hidrógeno son comparables en algunos tiempos de ignición cuando se aplica la técnica del convertidor catalítico; sin embargo, se muestra que a 22 BTDC la producción de estas emisiones se reduce considerablemente con la mezcla GN/hidrógeno.

En el caso de los hidrocarburos sin quemar, los niveles de la mezcla con hidrógeno siempre se encuentran por debajo de los del GN, debido a la reducción en el consumo del metano, principal componente del hidrocarburo.

4.5.2 Hidrógeno y Diesel

En el caso de los motores de ignición por compresión, también se han hecho adaptaciones para que el hidrógeno pueda funcionar en el ciclo diesel. Tal es el caso de la Universidad de Anna, en India [Saravanan et al., 2007]. En el trabajo publicado por los autores se reporta el uso de un motor de ignición por compresión de un cilindro con inyección directa. El combustible diesel funciona como una fuente de ignición. El hidrógeno se administra de dos maneras hasta llegar al flujo en estado estable a 1500 rpm, con una potencia de 3.78kW: por carburación y por inyección de puerto temporizada (TPI, por sus siglas en inglés).

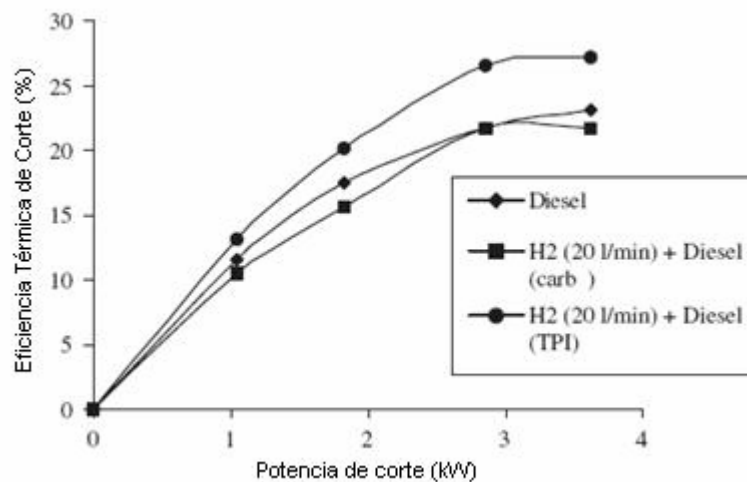


Figura 4.8. Eficiencia térmica de corte contra potencia de corte de un motor de ignición por compresión alimentado con diesel y diesel/hidrógeno [Saravanan et al., 2007].

En la Figura 4.8 se muestra la eficiencia térmica de corte contra la potencia de corte en los tres casos: cuando la máquina opera únicamente con diesel, cuando se administra hidrógeno a través del carburador y cuando se hace con un inyector de gas. Se puede observar que la mayor eficiencia se da con la mezcla diesel/hidrógeno con la técnica TPI, con un 27.5%.

En la Figura 4.9 se observa una gráfica de las emisiones de NO_x contra la potencia de corte. Esto se da debido a que la presencia de hidrógeno en la mezcla aumenta la temperatura y la velocidad de la flama.

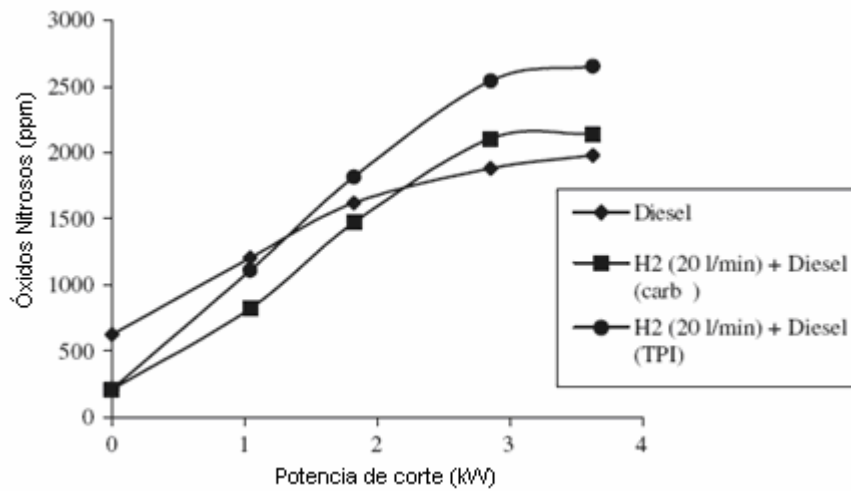


Figura 4.9. Emisiones de óxidos nitrosos contra la potencia de corte en un motor diesel alimentado con diesel y diesel/hidrógeno [Saravanan, 2007].

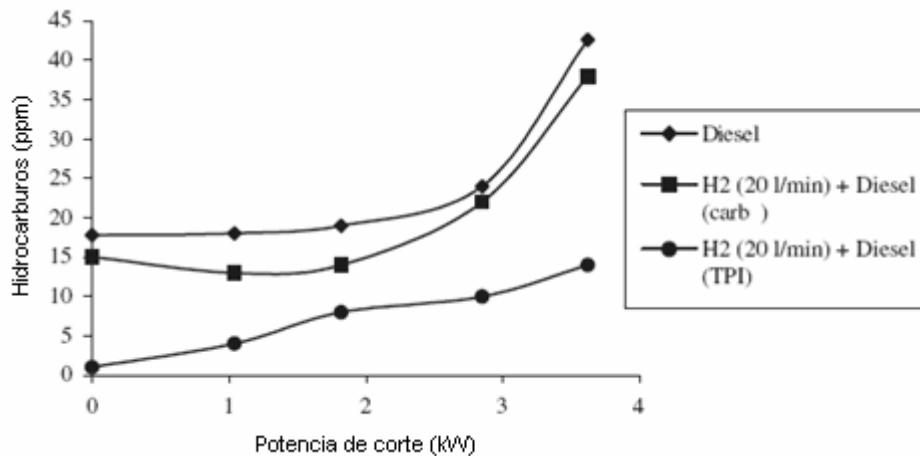


Figura 4.10. Emisiones de hidrocarburos sin quemar contra la potencia de corte en un motor diesel alimentado con diesel y diesel/hidrógeno [Saravanan, 2007].

En las Figuras 4.10 y 4.11 se observan las emisiones de hidrocarburos sin quemar y monóxido de carbono (CO). En la primera de ellas, el nivel de las emisiones de la mezcla diesel/hidrógeno con la técnica TPI permanece en todo momento por debajo del de la mezcla de diesel y diesel/hidrogeno con carburación. En el caso de la Figura 4.11 se puede apreciar que los niveles de las emisiones de CO permanecen similares hasta una potencia de salida de 3kW, que es cuando la inyección de hidrógeno mantiene las emisiones bajas, a diferencia de las otras dos

curvas, que aumentan los niveles hasta cuatro veces más, de lo que tenían antes de llegar a esos requerimientos de potencia.

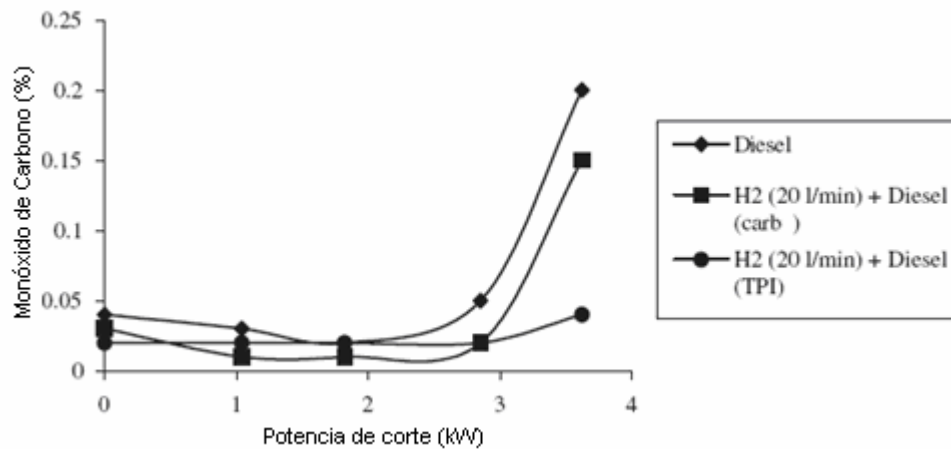


Figura 4.11. Emisiones de CO contra la potencia de corte en un motor diesel alimentado con diesel y diesel/hidrógeno [Saravanan, 2007].

4.5.3 Hidrógeno y Aire

En el Instituto Tecnológico Indio de Madrás se realizó y publicó un trabajo sobre la comparación entre la gasolina y el hidrógeno como combustible [Hari Ganesh, 2008]. Para ello se adaptó un motor monocilindro de ignición por chispa, enfriado por agua, para funcionar con hidrógeno a través de la inyección al múltiple de entrada. Los resultados en las emisiones de hidrocarburos indicaban que, usando hidrógeno como combustible, los niveles eran cercanos a cero, mientras que con gasolina se mantenían por arriba de las 2500ppm, a diferentes requerimientos de potencia. Asimismo, el consumo específico de combustible, trabajando con hidrógeno, es de menos de la mitad que el de la gasolina, debido a la baja densidad del primero. Para el caso de las emisiones de óxidos nitrosos se reportaron niveles mayores en la combustión del hidrógeno, comparado con la gasolina. Las emisiones para el primero se encontraban alrededor de 8000ppm, a un índice de equivalencia de 0.85, mientras que para la gasolina se reportaban 2000ppm a un índice de equivalencia de 1.03, aproximadamente.

En la Figura 4.12 se observa la comparación de la potencia de corte con ambos combustibles a prueba. La mínima energía de autoignición y el amplio rango de flamabilidad del hidrógeno permiten que se pueda dar la combustión a índices de equivalencia menores que con la gasolina,

y se observa que se puede obtener una potencia mayor en ciertos índices. La máxima potencia que alcanzó el motor, funcionando con hidrógeno, es del 80% de la potencia alcanzada con gasolina.

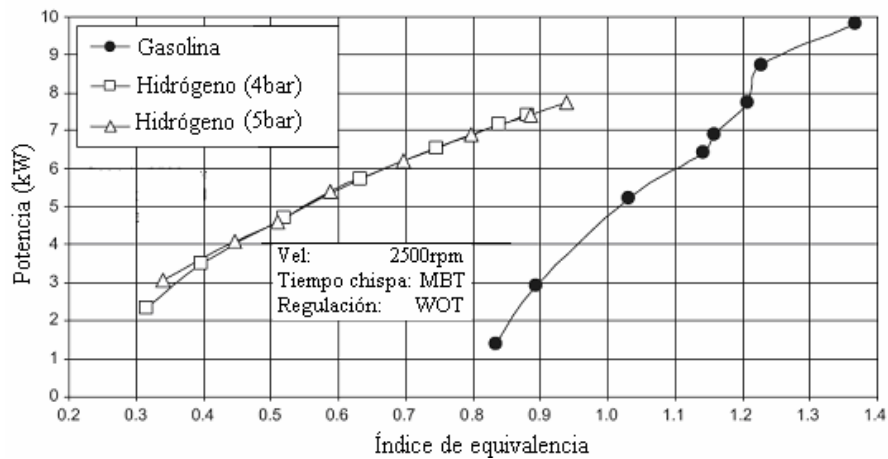


Figura 4.12. Potencia de corte contra el índice de equivalencia en un motor de ignición por chispa comparando el uso de gasolina como combustible y de hidrógeno [Hari Ganesh, 2008].

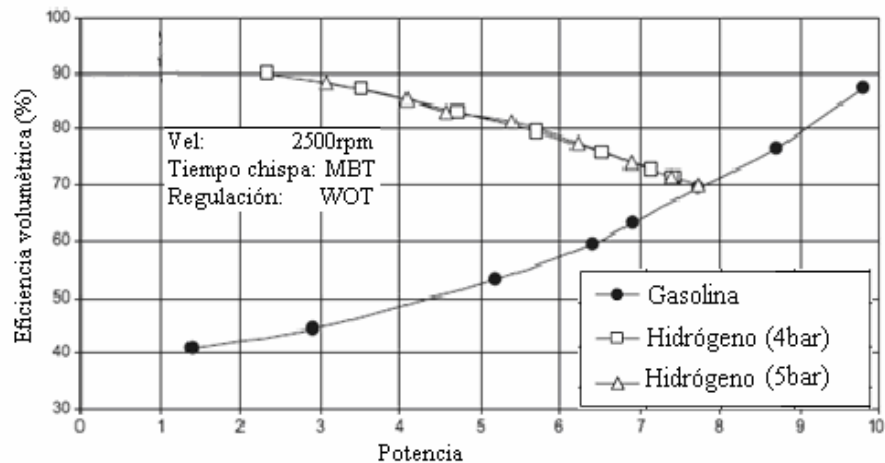


Figura 4.13. Comparación de las eficiencias volumétricas de un motor de ignición por chispa funcionando con gasolina y con hidrógeno a presiones diferentes de inyección, en función de la potencia de corte [Hari Ganesh, 2008].

En cuanto a las eficiencias, en las figuras 4.13 y 4.14 se pueden observar las gráficas de la eficiencia volumétrica contra la potencia y la eficiencia térmica contra los índices de equivalencia, respectivamente. En la primera de ellas se observa una mejor eficiencia volumétrica, en comparación con la gasolina, cuando los requerimientos de potencia se encuentran entre los 2 y los 7kW, pero en requerimientos mayores, es la gasolina con la que se obtienen mejores eficiencias. En el caso de la eficiencia térmica, se puede observar un máximo

alrededor de 27%, a diferentes velocidades, superando a la de la gasolina, que se encuentra alrededor del 25%.

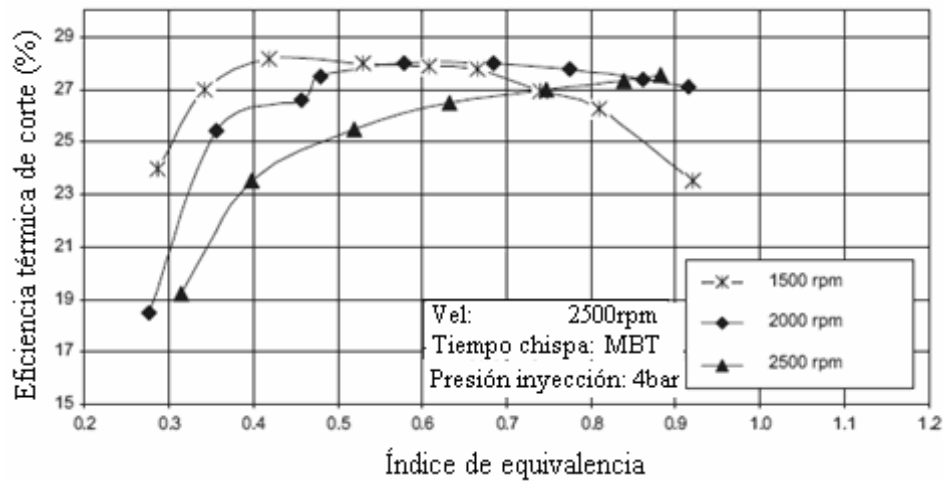


Figura 4.14. Variación de la eficiencia térmica de corte contra el índice de equivalencia, de un motor de ignición por chispa alimentado con hidrógeno a diferentes velocidades [Hari Ganesh, 2008].

En un centro técnico de la empresa Toyota, en Bélgica, se realizó un trabajo experimental sobre las características de combustión y desempeño de un motor de ignición por chispa, con un solo cilindro de 4 tiempos [Mohammadi, 2007]. Se realizaron varios tipos de pruebas, pero las que corresponden al tiempo de inyección se dividían básicamente en:

- 1.- Inyección de hidrógeno durante la carrera de entrada (300° BTDC).
- 2.- Inyección de hidrógeno durante la carrera de compresión (130° BTDC).

La inyección durante la carrera de entrada inhibe el retroceso de flama, pero la eficiencia térmica y la potencia de salida se ven limitadas por el golpeteo y la reducción en la eficiencia volumétrica. La inyección de hidrógeno durante la carrera de compresión previene el golpeteo, incrementa la eficiencia térmica y se maximiza la salida.

Durante estas primeras pruebas se observaron eficiencias volumétricas semejantes a las de Hari Ganesh. Sin embargo, se observó que al retardar el tiempo de inyección durante la carrera de compresión se puede lograr un eficiencia térmica de hasta un 38.9%, reduciendo al mismo tiempo la emisión de óxidos nitrosos.

Por otra parte, en la Universidad de Riverside, en California, Estados Unidos, se realizó una investigación sobre la técnica de recirculación de gases de escape en un motor de hidrógeno, a distintos flujos de combustible (Heffel, 2003). En ella, se dio a conocer esta técnica como un método efectivo para reducir las emisiones de óxidos nitrosos a menos de 10ppm, logrando una mejor potencia de salida que con las mezclas de carga ligera (ϕ menores a 0.45, es decir, 14% de hidrógeno), con eficiencias termodinámicas de hasta un 31%. Para ello se adaptó un motor Ford de cuatro cilindros y un volumen de 2l por cada cilindro, conectando una línea que condujera los gases de escape al múltiple de entrada de aire. Se usaron flujos de combustible de 0.78 hasta 1.63kg/h, que corresponden a un rango de ϕ de 0.35-1.02, a los que les iban introduciendo los gases de escape de manera gradual, sustituyendo el aire. Todo esto se desarrolló en seis experimentos diferentes a 1500rpm.

4.6 Conclusiones

Es importante conocer los fundamentos químicos y físicos de la reacción de combustión, para poder hacer cálculos de velocidades de reacción, calores, temperaturas alcanzadas, eficiencias, entre otros. Con esto se puede entender mejor el mecanismo de la combustión, para tener un mejor control sobre las variables antes mencionadas. Sin embargo, debido a las características del hidrógeno, se deben hacer adaptaciones a las ecuaciones de la cinética química y la termodinámica química para las cuales no aplica la reacción de combustión del hidrógeno.

Se deben contemplar los logros en cuanto a eficiencias y potencias de salida presentadas en la literatura para investigar sobre las mejores mezclas, según los parámetros requeridos, en el desempeño del motor, para determinadas aplicaciones.

Se debe buscar la combinación óptima entre emisiones y salida del motor, según las características en el desempeño que se quieran obtener, ya sea para vehículos de pasajeros, normalmente usados en la ciudad, o para vehículos de carga y aquellos utilizados para recorrer grandes distancias.

En la Tabla 4.2 se muestran algunas especificaciones que se recomiendan para diversas mezclas de gas/hidrógeno con las que se puede experimentar en un motor de combustión interna.

Dichas recomendaciones surgen a partir de los trabajos estudiados previamente, habiendo tomado en cuenta las medidas que dieron mejores resultados, en cuanto a las características de desempeño de los motores con los que los autores han trabajado.

Tabla 4.2. Especificaciones técnicas de factibilidad para las distintas mezclas de gas/hidrógeno en motores de combustión interna.

Tipo de motor	Técnica a aplicar	Adaptación que se sugiere	Metodología experimental
Ignición por chispa	<u>Para los motores que usan mezclas de hidrocarburo/hidrógeno</u> , se recomienda iniciar con mezclas ligeras de combustible, con el objeto de reducir las emisiones más comunes de los combustibles convencionales, sin tener que reducir de manera importante la salida.	Se debe iniciar con porcentajes de alrededor de 5% de hidrógeno en la mezcla estequiométrica del combustible, a través del sistema de admisión. Esto se puede con combustibles como gasolina, gas natural comprimido y metano.	Para realizar mediciones se recomiendan sensores de emisiones de CO, CO ₂ , hidrocarburos sin quemar y NO _x , junto con dinamómetros para medir la salida de potencia, con el objeto de encontrar la proporción adecuada de hidrógeno que reduzca de manera importante las emisiones, a una salida de potencia suficiente.
	<u>Para los motores que usan únicamente mezclas aire/hidrógeno</u> , se sugiere el uso de mezclas en un rango mayor de índice de equivalencia, procurando evitar los fenómenos anormales de la combustión.	Es necesario realizar experimentación con índices de equivalencia en el rango de 0.3 a 0.9, y relaciones de compresión a partir de 12:1, modificando los tiempos de apertura y cierre de válvulas, así como el tiempo de chispa.	Se requiere equipo como dinamómetros eléctricos para realizar mediciones de salida de potencia, así como cromatógrafos de gases para evaluar las emisiones de gases, y sensores de temperatura y presión, para calcular las distintas eficiencias involucradas en el desempeño de un motor.
Ignición por compresión	<u>Este tipo de motores requiere de un inductor o fuente de ignición</u> . Para esto es necesario que dicho inductor (diesel) sea el único combustible, inicialmente.	Se debe introducir el hidrógeno en la cámara, mientras se va reduciendo la inyección de diesel, hasta los valores requeridos de potencia y emisiones. Al momento de lograr una mezcla estable, debe estar compuesta principalmente por hidrógeno	Para este propósito se requieren medidores de caudal, además del equipo mencionado anteriormente, para conocer los parámetros de potencia, emisiones y eficiencia.

4.7 Referencias

- Bysveen, M. Engine characteristics of emissions and performance using mixtures of natural gas and hydrogen, *Journal of Energy* **32** (2007) 482-489.
- Das, L. M. Hydrogen-oxygen reaction mechanism and its implication to hydrogen engine combustion, *International Journal of Hydrogen Energy* **21** (1996) 703-715.
- Glassman, I. *Combustion* (2a ed., Academic Press, Orlando, 1987).
- Heffel, J. NO_x emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500rpm using exhaust gas recirculation, *International Journal of Hydrogen Energy* **28** (2003) 901-908.
- Heywood, J. B. *Internal combustion engine fundamentals* (Mc Graw Hill, Nueva York, 1989).
- Kuo, K. *Principles of combustion*. (J. Wiley, New York, 1986).
- Li, H., Karim, G. Knock in spark ignition hydrogen engines, *International Journal of Hydrogen Energy* **29** (2004) 859-865.
- Hari Ganesh, R. et al. Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: An experimental study, *Journal of Renewable Energy* **33** (2008) 1324-1333.
- Mohammadi, A. Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine, *International Journal of Hydrogen Energy*. **32** (2007) 296-304.
- Obert, E. *Internal combustion engines* (2a ed., International Textbook Company, Scranton, 1968).

- Orhan Akansu, S., et al. Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy* **29** (2004) 1527-1539.
- Saravanan, N. An experimental investigation on DI diesel engine with hydrogen fuel, *Journal of Renewable Energy* **33** (2008) 415-421.
- Sørensen, B. *Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications* (Elsevier Academic Press, Amsterdam, 2005).
- Stone, R. *Introduction to internal combustion engines*. (3a ed., Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, 1999).
- White, C. M., Steeper R. R., Lutz A. E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical Review, *International Journal of Hydrogen Energy* **31** (2006) 1292-1305.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

5.1 Introducción

A lo largo de los tres últimos capítulos se han revisado los avances más novedosos en materia de combustión de hidrógeno y su aplicación para los motores de combustión interna. Resulta de especial interés el análisis de factibilidad de las adaptaciones hechas a nivel experimental en diversos laboratorios del mundo, con el objeto de buscar su inclusión en la investigación científica de México.

La desventaja de realizar un estudio teórico sobre adaptaciones experimentales radica en el hecho de que no existe un contacto directo con los diferentes obstáculos técnicos que se presentan en un laboratorio, donde se trabaja con equipos de medición y dispositivos reales. Sin embargo, dicho estudio representa una herramienta muy útil para iniciar una labor científica bajo condiciones de experimentación no ideales, con el antecedente de un análisis previo que permite conocer las variables a medir y anticipar algunos problemas que se puedan presentar. Los resultados de investigaciones publicadas constituyen un avance útil para iniciar un proyecto de motores de combustión interna alimentados con hidrógeno.

Cuando se realiza la integración de las distintas partes que conforman un motor, se puede definir un punto de partida en el que se pueda concretar un trabajo experimental. Es decir, la conjunción de los sistemas de inyección, enfriamiento y mezclas en un motor, puede ofrecer un panorama más claro sobre las adaptaciones necesarias en un motor convencional, para funcionar con hidrógeno.

De manera más específica, se puede hablar de ciertas ventajas y desventajas que presenta el hidrógeno como combustible, y en base a ellas establecer ciertos parámetros de adaptación.

5.2 Discusión y análisis

Se sabe que el hidrógeno es un gas altamente corrosivo, que tardaría solo unos minutos en causar daños catastróficos a inyectores convencionales, así como a las distintas válvulas y conductos del sistema de alimentación. Por esto, es necesario adquirir cierto tipo de inyectores que puedan soportar el flujo de este combustible, con superficies especialmente duras e índices de fricción bajos, que le proporcionen al dispositivo larga durabilidad, con un funcionamiento óptimo. Para el sistema de inyección se debe considerar la investigación en materiales que se puedan adherir a las superficies internas de las diferentes partes de dicho sistema, con el propósito de hacer más barata la tecnología del hidrógeno. Si se desea simplemente aplicar la tecnología ya existente para experimentar en un motor de combustión interna, se deben adquirir inyectores que se encuentran en el mercado, para suministrar hidrógeno, como aquéllos de las marcas Hoerbiger, Landirengo, Westport, Bosch, entre otras.

Para la inyección de hidrógeno, en la Universidad de Sungkyunkwan, de Japón, se utilizó un sistema con dos inyectores, uno de mezcla externa y otro directamente en el cilindro [Lee y Kim, 2006]. Para ello desarrollaron un inyector que pudiera mantener la alta presión del hidrógeno para ser introducido en el cilindro. Esta técnica resulta de especial interés porque puede combinar altas eficiencia y potencia, lo cual viene a ser uno de los grandes avances en materia de motores de combustión interna. Sin embargo, en el reporte de los autores no se considera la desventaja de la complejidad que representa tener un sistema dual de inyección, en lo que se refiere a la construcción y el diseño del espacio, a pesar de que se experimenta con un solo cilindro. Se considera que para una siguiente etapa de dicho trabajo, deberá usarse un motor de más cilindros, pudiendo emplear una sola mezcla externa para todos ellos, pero con un inyector directo de alta presión para cada uno.

En cuanto al sistema de enfriamiento, se deben observar igualmente las características del hidrógeno, ya que su rápida combustión provoca aumentos repentinos de temperatura, aún más que aquéllos ocasionados por la combustión de gasolina. Es por esto que dicho sistema debe ser más eficiente y preciso, poniendo énfasis en los puntos calientes que entran en contacto con el hidrógeno, tales como las boquillas de los inyectores, las cercanías de los electrodos de la bujía y la cabeza del cilindro. La investigación sobre técnicas novedosas de control de temperatura es requerida para poder introducir al hidrógeno como un combustible seguro y eficiente. Es en este

punto donde la relación entre los sistemas de inyección y enfriamiento toma una mayor importancia, ya que el adecuado control de la temperatura de los inyectores permite aumentar la eficiencia volumétrica y evitar fenómenos anormales de la combustión durante el proceso de inyección. Además, el retraso en el tiempo de inyección también tiene efectos positivos en el enfriamiento, ya que puede contribuir a tener una combustión más completa y aumentos de temperatura menos agresivos.

De igual importancia que el control de la temperatura es la reducción de las pérdidas por enfriamiento [Shudo, 2007]. Cuando se enfría un motor, es calor generado por la combustión lo que se desecha, mediante el proceso de convección, generalmente. Esto significa pérdidas en el sistema, las cuales se pueden minimizar si se aumenta el uso de dicho calor para generar movimiento. En este punto, la idea principal es maximizar la conversión del calor de combustión en movimiento, con el propósito de enfriar menos, lo cual significa aumentar la eficiencia térmica del ciclo. Un par de estrategias útiles para la reducción de las pérdidas por enfriamiento es el retardo de la chispa y la inyección de carga estratificada (nuevamente el sistema de inyección se relaciona de manera importante con el control de la temperatura).

En el tercer capítulo se sugirió una técnica para enfriar la cabeza de los cilindros, la cual se puede encontrar aplicada en una investigación experimental para motores diesel de alta potencia [Trenc et al., 1998]. Sin embargo, mediante la solución numérica de la ecuación de transferencia de calor unidimensional en estado transitorio, se pudo comprobar la efectividad de dicha técnica para mantener la parte superior del cilindro por debajo de la temperatura de autoignición en un motor alimentado con hidrógeno, en el presente trabajo. Hasta el momento no se ha encontrado su aplicación en trabajos previos. En este sentido, se puede decir que un estudio más avanzado sobre la transferencia de calor en la cámara de combustión puede llevar a más y mejores estrategias de enfriamiento.

Ahora, el control de la temperatura puede ser más eficaz si se le suma el uso de hidrógeno líquido como combustible, ya que la temperatura de almacenamiento de éste es de 20K, aproximadamente. Existen pocos trabajos publicados al respecto [White y Steeper, 2000], ya que la mayoría de las investigaciones se han enfocado en el hidrógeno gaseoso; sin embargo, existen ya algunos prototipos comerciales (BMW, Mazda, Ford, etc.) a costos muy elevados, sin poder estar al alcance del público en general. La inyección del hidrógeno líquido se hace en estado

gaseoso, pero teniendo aún temperaturas muy bajas. Esto provocaría que los inyectores, la cabeza del cilindro y la zona de las bujías se enfriaran al entrar en contacto con el combustible aún por quemar. La problemática que presentaría se refiere a la condensación del aire exterior a los conductos del sistema de alimentación, ocasionando daños por la presencia de humedad en los diferentes dispositivos del motor. Una posible solución a este problema podría ser el uso de aislantes térmicos en los distintos conductos que suministran el hidrógeno a la cámara de combustión. En cuanto al almacenamiento, se han diseñado, de manera comercial, materiales con muy pequeños coeficientes de transferencia de calor [BMW, 2007], basados en múltiples capas de aluminio, que pueden mantener el hidrógeno a temperaturas criogénicas, para conservarlo en estado líquido. Sin embargo, aún no se ha logrado hacer más barato el costo de almacenamiento a bajas temperaturas, limitando el alcance comercial del hidrógeno líquido. La investigación científica debe dedicarse a la búsqueda de materiales superaislantes, a menores costos de obtención y fabricación.

En el estudio de las mezclas de hidrocarburo/hidrógeno se ha encontrado que el hidrógeno puede funcionar como un aditivo en la mezcla, en pequeños porcentajes, para reducir las emisiones de CO, CO₂ e hidrocarburos sin quemar, y para aumentar la potencia del motor, mediante una combustión más completa y con mayor valor calorífico. La aplicación de estas mezclas se puede llevar a cabo de maneras relativamente sencillas, con menor grado de dificultad comparadas con aquéllas compuestas únicamente de aire e hidrógeno, pudiendo ser el primer paso para su uso como combustible. Cuando se realizan mezclas de gas natural e hidrógeno, existe la ventaja de que los inyectores del primero han demostrado ser eficaces para el suministro del hidrógeno, pudiendo soportar la alta corrosión y presión del gas.

En el caso de los motores por compresión, el hidrógeno no puede funcionar como único combustible, ya que se necesita un iniciador de la combustión, para lo que normalmente se usaría diesel [Saravanan, 2008]. La cantidad suministrada de cada combustible dependerá de los requerimientos de potencia y el tiempo que lleve el motor encendido, hasta el punto de operar con una mezcla ligera de hidrocarburo y rica en hidrógeno. Es aquí donde reside la principal desventaja de los motores de compresión comparándolos con los de ignición por chispa, para la introducción del hidrógeno como combustible.

Los sistemas de inyección y mezcla deben estar coordinados cuando se usan dos combustibles, ya que esto significa usar un inyector capaz de suministrar ambos o, en su defecto, uno para cada tipo de combustible, pudiendo necesitar más espacio para éstos. Las válvulas en donde se realiza previamente la mezcla son de gran utilidad para usar un solo inyector, que pueda mantener la carga lo suficientemente presurizada para introducirla en la cámara de combustión.

El objetivo final de la investigación en motores de hidrógeno debe estar enfocado en hacer factible un motor que opere únicamente con hidrógeno como combustible, con total autonomía y altos rendimiento y eficiencia, además de emisiones de NO_x muy bajas (menores a 10ppm). En este sentido se debe hacer investigación para encontrar la mejor combinación entre índice de equivalencia, relación de compresión, y tiempos de chispa e inyección, procurando combustiones más completas, con altas eficiencias volumétrica y térmica, y alta potencia de salida. Se ha comprobado que las mezclas ligeras de aire/hidrógeno tienen emisiones de NO_x mínimas, haciendo su uso posible en vehículos pequeños que no requieren alta velocidad ni carga muy pesada, por lo que al aumentar la relación de compresión se puede obtener una potencia suficiente. Las mezclas ricas de aire/hidrógeno ofrecen la ventaja de proporcionar mayores potencias. Sin embargo, las emisiones aumentan, por lo que es necesario aplicar estrategias como la recirculación de los gases de escape y el retardo en los tiempos de inyección y chispa, usando cargas estratificadas.

5.3 Referencias

- Lee, J. T., Kim, Y. Y. The development of a dual injection hydrogen fueled engine with high power and high efficiency, *Journal of engineering for gas turbines and power* **128** (2006) 203-212.
- Shudo, T. Improving thermal efficiency by reducing cooling losses in hydrogen combustion engines, *International Journal of Hydrogen Energy* **32** (2007) 4285-4293.
- Trenc, F., Rodman, S., Skerget, L., Delic, M. Optimum cylinder cooling for advanced diesel engines, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **120** (1998) 657-663.

- White, C. M., Steeper R. R., Lutz A. E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical Review, International Journal of Hydrogen Energy **31** (2006) 1292-1305.
- Saravanan, N. An experimental investigation on DI diesel engine with hydrogen fuel, Journal of Renewable Energy **33** (2008) 415-421.
- www.bmw.com

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describieron los avances realizados en materia de la combustión de hidrógeno y su uso como combustible para motores de combustión interna. Se hizo una revisión bibliográfica amplia, tomando en cuenta los aspectos más relevantes de algunos trabajos publicados sobre el tema en los últimos años, y se hizo un análisis de las ventajas y desventajas que presenta el uso del hidrógeno, así como las mejores condiciones del mismo, para obtener un desempeño favorable.

En la literatura se encuentra una gran variedad de trabajos publicados, así como de temas relacionados con la combustión de hidrógeno; sin embargo, tres aspectos en adaptaciones se tomaron en consideración:

- 1) Sistema de inyección e inyectores.
- 2) Sistema de enfriamiento.
- 3) Mezclas.

Las publicaciones fueron seleccionadas según cumplieran los temas que correspondieran a los objetivos del presente trabajo.

Las conclusiones tomadas en este capítulo se presentan como recomendaciones para proyectos futuros de investigación científica, orientados a desarrollar tecnología que colabore a insertar al hidrógeno como combustible en máquinas de combustión interna.

Con respecto a los inyectores, se llegó a la conclusión de que se necesita realizar investigación experimental orientada a encontrar recubrimientos que permitan disminuir el índice de fricción de la superficie del inyector que entra en contacto con el hidrógeno, tales como el grafito. Entonces se propone el realizar el desarrollo de materiales que sirvan como recubrimiento a los inyectores, de tal manera que ayuden a reducir dichos índices. Para ello se propone

materiales derivados del carbón o similares que, además de contar con un bajo valor de fricción, pueden soportar grandes esfuerzos mecánicos. Se ha encontrado que los inyectores de gas natural presentan un desempeño muy favorable, al ser utilizados con hidrógeno gaseoso, por lo que el uso y experimentación con estos inyectores en la investigación puede ser de gran ayuda para la introducción del hidrógeno como combustible, sin la necesidad de muchas adaptaciones. En relación al tipo de boquillas, se recomienda usar las de múltiples orificios, contribuyendo así a una mejor difusión del gas y una combustión más completa. En resumen, se puede mencionar que será necesario el iniciar trabajos experimentales sobre nuevos y mejores materiales para ser utilizados como recubrimientos en inyectores, cuyo diseño deberá ser parecido a los utilizados en los que actualmente se utilizan con gas natural.

En el tema del enfriamiento, se ha visto que se necesita un sistema más efectivo para el control de la temperatura, ya que la flama del hidrógeno es más caliente que la de la mayoría de los hidrocarburos combustibles. Se sugiere un mayor flujo de refrigerante en las zonas cercanas a la bujía (en el caso de los motores de ignición por chispa), las válvulas de admisión, de escape y en la parte superior del cilindro, lugares que se caracterizan por tener un mayor calentamiento al fluir hidrógeno en ellos. Al tomar en consideración estas medidas, también se evitan los fenómenos anormales de la combustión, tales como la preignición, el retroceso de flama y el golpeteo. Reducir las pérdidas por enfriamiento puede ser una medida para incrementar la eficiencia térmica de un motor y evitar los aumentos excesivos de temperatura, ya sea por la recirculación de gases de escape o simplemente aumentando la relación de compresión del cilindro. Para lograr esto será necesario el enfocar el trabajo experimental en el desarrollo de los sistemas que permitan realizar un diseño que aumente el flujo de refrigerante, muy cerca de la bujía.

Con este fin, se propuso un diseño probado en la literatura para motores diesel, que puede construirse para experimentación. Consiste en un canal curvilíneo con área transversal en forma rectangular, alrededor de la cabeza del cilindro, alimentado con aceite lubricante. Para comprobar la eficacia del método se resolvió la ecuación de transferencia de calor unidimensional en estado transitorio, con dos fronteras de convección. Se encontró el mejor coeficiente de transferencia de calor ($800\text{W/m}^2\text{ K}$) para la velocidad del flujo que pueda mantener la pared del cilindro a una temperatura por debajo de la de autoignición (2.97m/s). Cabe señalar que el método propuesto se basa en aproximaciones y se supone una mezcla estequiométrica, así como una combustión

completa, y no se considera el calentamiento por fricción u otros factores. Sin embargo, es una herramienta muy útil para el estudio de la transferencia de calor en la cámara de combustión de un HICE. Por lo tanto, la estrategia de enfriamiento propuesta representa una alternativa para evitar el sobrecalentamiento del motor y los consecuentes fenómenos anormales de la combustión. Es a través de la investigación, la especialización de cálculos y la especificación de parámetros que la técnica propuesta puede tener mayores alcances.

El uso de hidrógeno líquido presenta una alternativa a los sistemas de inyección gaseosos y tiene la ventaja de que la baja temperatura de inyección puede contrarrestar los efectos del sobrecalentamiento del motor. Además, la densidad energética del combustible se incrementa más allá de la de cualquier hidrocarburo y ocupa un volumen mucho menor que el hidrógeno gaseoso. Por otra parte, presenta la desventaja de que la producción de hidrógeno líquido tiene un elevado costo energético y la tecnología del almacenamiento criogénico resulta aún de gran costo económico, aunque existe actualmente interés por la investigación de nuevos y mejores materiales aislantes.

El hidrógeno puede hacer combustión en mezclas con gas natural, diesel o como único combustible. Esto depende de los requerimientos que se le den al motor. En general, se ha visto que es conveniente que se tenga un inductor de la ignición, como el diesel, por ejemplo, que permita en motores de ignición por compresión la reducción de las emisiones y el aumento en la potencia mediante la adición de hidrógeno a la mezcla. El amplio rango de flamabilidad del hidrógeno y su baja energía mínima de ignición permiten que este combustible pueda hacer combustión a índices de equivalencia muy variados y bajo condiciones diversas.

Se ha visto, a nivel laboratorio, que la eficiencia térmica de un motor de ignición por chispa alimentado con hidrógeno puede superar a aquella lograda con un motor de gasolina (38.9% del hidrógeno contra el 25% de la gasolina). Además, la potencia de salida de un motor alimentado con hidrógeno ha alcanzado un 80% del de uno alimentado con gasolina.

Las emisiones que presentan las mezclas aire/hidrógeno son esencialmente óxidos nitrosos y dióxido de carbono. En el caso de los óxidos nitrosos, se observan dichos niveles de emisiones, que se deben a la mayor temperatura y velocidad de flama del hidrógeno con respecto a otros combustibles como la gasolina. Un motor de combustión interna que opere con hidrógeno puede

presentar emisiones de hidrocarburos debido a la dependencia de lubricantes y refrigerantes derivados del petróleo.

La combustión de hidrógeno a carga ligera, reduciendo el tiempo de inyección y retardando la chispa, puede reducir las emisiones de NO_x y evitar los fenómenos anormales de la combustión. Se recomienda, particularmente para la investigación con motores de ignición por chispa, diseñar experimentos con mezclas de aire/hidrógeno en los que el rango del índice de equivalencia sea $\phi \sim 0.3-0.9$, usando relaciones de compresión a partir de 12:1, con técnicas de recirculación de gases de escape, reducción en los tiempos de inyección y retardo en el tiempo de chispa. Para los motores de ignición por compresión se recomienda igualmente aumentar las relaciones de compresión con recirculación de gases y, principalmente, usar un inductor de la ignición (diesel, por ejemplo) e introducir la mezcla de hidrógeno de manera gradual hasta alcanzar el nivel de potencia requerido.

El uso de hidrógeno en motores de combustión interna puede formar parte de una solución integral a los problemas del agotamiento de combustibles fósiles y de contaminación ambiental. Una de las principales ventajas es que hoy en día la infraestructura y los avances tecnológicos en materia de motores puede ser útil en la inserción del hidrógeno como combustible. Esto significaría una introducción a mediano plazo de un gran porcentaje de vehículos de combustión interna corriendo con hidrógeno.

Existen ya en el mercado automóviles que funcionan con hidrógeno, de las empresas Ford, BMW, Toyota, entre otras, a precios no muy accesibles y sin una producción en masa. Sin embargo, esta tecnología debe y puede estar al alcance del público en general, si se quieren reducir los efectos de la contaminación y el agotamiento de recursos.

Los aspectos más importantes del trabajo de investigación realizado se reportaron en el presente documento como apoyo en el diseño y realización de un futuro proyecto de investigación experimental de combustión de hidrógeno en motores. México es un país que cuenta con la infraestructura necesaria para incluir proyectos experimentales relativos a este tema en su quehacer científico y empezar a vislumbrar un futuro que reduzca de manera importante la dependencia de los combustibles fósiles.