

2013

PROYECTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Adaptación de un motor de combustión interna
para usar hidrógeno como combustible

William Hughes
Matias Llansa
Maximiliano Bossolasco
German Soria

30/04/2013





Proyecto de Ingeniería Mecánica

Adaptación de un motor de combustión
interna para usar hidrógeno como
combustible.

Docentes

Luís Bugna

Daniel Barilá

Rodolfo Gómez

Autores

Matias Llansa

William Hughes

Maximiliano Bossolasco

Germán Soria



Resumen

El uso de hidrógeno como combustible es una alternativa a los serios problemas de contaminación que afronta la humanidad. El hidrógeno quemado dentro del motor genera básicamente vapor de agua como producto de combustión que es desechado por el escape. En caso de utilizar hidrógeno obtenido de electrólisis del agua, el ciclo es ecológicamente sustentable ya que el agua generada por la combustión es equivalente a la utilizada en el proceso de obtención del hidrógeno. Si se pretende obtener una potencia similar a la que el motor entrega utilizando hidrocarburos, debe desarrollarse un sistema de inyección electrónica de combustible sincronizada.

La adaptación de un motor convencional para que pueda utilizar hidrógeno involucra modificaciones de importancia en el sistema de alimentación que debe ser adaptado a las características específicas de este combustible, fundamentalmente atendiendo a las condiciones de seguridad y a su baja energía de ignición.

Los autores del presente proyecto en conjunto con integrantes del Departamento de Ingeniería Mecánica y Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNPSJB decidieron incursionar en la investigación de este tipo de motores y para ello implementaron una serie de equipos y dispositivos que permiten desarrollar las actividades experimentales asociadas a dicha investigación. Para esto, se adecuó un pequeño motor monocilíndrico modificando sus sistemas de control de potencia, diseñando un sistema de inyección específico para las nuevas condiciones de operación y construyendo un banco dinamométrico eléctrico adaptado a las necesidades específicas de los ensayos a realizar.

Es en el aspecto referido a la formación de mezcla en el que más se ha trabajado ya que utilizando un sistema de formación de mezcla convencional, se favorece la aparición de combustión en el tubo de admisión, fenómeno conocido como “contra explosión” o “backfire”.

Gracias a las modificaciones realizadas en el motor, la fabricación del banco de ensayos, los equipos y sensores implementados fue posible efectuar una serie de ensayos que permiten comparar el comportamiento y las prestaciones del motor con el uso de nafta e hidrógeno como combustible.

Cabe aclarar que las modificaciones realizadas en el motor en sí fueron sólo las necesarias para lograr una inyección secuencial de hidrógeno en el tubo de admisión. No se han alterado los parámetros esenciales del motor original (relación de compresión, sistema y reglaje de distribución, cilindrada, etc.). La futura intervención sobre estos parámetros, debería permitir obtener potencias y rendimientos mayores a las alcanzadas con el uso de hidrocarburos.



Contenido

Resumen.....	3
1. Introducción.....	7
1.1 La matriz energética Argentina.....	8
1.2 El hidrógeno como vector de energía.....	19
1.3 Estado actual de la tecnología relacionada al hidrógeno.....	22
En el mundo.....	22
En el país	31
1.4 Motivaciones y objetivos del proyecto	32
2. Propiedades del Hidrógeno.....	38
2.1 Estructura atómica	38
2.2 Propiedades físicas.....	38
2.2.1 Estado	38
2.2.2 Olor, color y gusto	39
2.2.3 Toxicidad.....	39
2.2.4 Densidad y medidas relacionadas	40
2.3 Propiedades químicas.....	42
2.3.1 Reactividad.....	42
2.3.2 Energía.....	43
2.3.3 Inflamabilidad.....	44
2.3.4 Fragilización por hidrógeno.....	53
3. Hidrógeno en MCIA.....	54
3.1 Breve historia sobre los motores de hidrógeno	54
3.2 Propiedades combustibles del hidrógeno	55
3.2.1. Amplia gama de inflamabilidad.....	55
3.2.2. Baja energía de ignición	56
3.2.3. Pequeña distancia de apagado	57
3.2.4. Temperatura de autoignición elevada	57
3.2.5. Alta velocidad de llama	58
3.2.6. Alta difusividad	58
3.2.7. Baja densidad.....	58
3.3 Relación aire/combustible.....	59
3.4 Problemas y soluciones del preencendido.....	63
3.5 Evolución técnica de los motores de nafta a hidrógeno	66



Control del aceite del motor	66
Tapa de cilindros y refrigeración.....	67
Sistemas de ignición.....	67
Cambios estructurales.....	68
Sistemas de suministro de combustible	68
Ventilación del cárter del motor	70
Sistema de escape.....	71
Aceite lubricante.....	71
3.6 Eficiencia térmica	71
3.7 Emisiones.....	72
3.8 Potencia obtenida.....	75
4. Objetivos del presente proyecto	76
4.1 Lineamientos generales y establecimiento de objetivos.....	76
5. Desarrollo	77
5.1 General.....	77
5.2 MCIA.....	77
Marco teórico	77
Caracterización del motor estándar	87
Modificaciones realizadas	89
Secuencia de inyección y encendido	106
5.3 Banco dinamométrico	115
Marco teórico	¡Error! Marcador no definido.
Generador	120
Motor de arranque	123
Sistema de transmisión MCIA – Generador.....	124
Sistema de transmisión Generador – Motor de arranque.....	130
5.4 Conducciones y almacenamiento.....	131
Conducciones	¡Error! Marcador no definido.
Aprovechamiento energético del tubo de H ₂	136
6. Ensayos realizados y resultados	139
7. Conclusiones y objetivos futuros.....	143



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PATAGONIA SAN JUAN BOSCO

Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Proyecto de Ingeniería Mecánica

30/04/2013

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica

Página 6 de 143



1. Introducción

A raíz de la necesidad de inminentes cambios en la matriz energética mundial, será necesario ir reemplazando poco a poco las actuales tecnologías por otras nuevas. Ese proceso deberá ser gradual y amplio, buscando alternativas de todo tipo que contemplen soluciones a la totalidad de los procesos tecnológicos actuales. Sobre esas alternativas se decidió trabajar en el presente proyecto, intentando realizar un humilde aporte a esta causa.

Los escenarios que se plantean para el futuro energético de nuestro planeta son variados, sin embargo hay un punto en el que todos confluyen: es imperiosa la necesidad de reducir la dependencia sobre las fuentes no renovables de energía, y en particular de los hidrocarburos.

El modelo energético actual, basado en los combustibles fósiles, presenta serios problemas de sostenibilidad. La escasez de petróleo, con su consecuente encarecimiento, y la normativa ambiental de emisiones, cada vez más restrictiva, hacen del hidrógeno un vector energético atractivo.

El hidrógeno se utiliza ya en la industria química y como propulsante en motores cohete. Es posible que con el correr de los años, la utilización en gran escala del hidrógeno como combustible y como medio de acumulación y transporte de energía, se presente como una opción clara para la Humanidad, una vez esté próximo el agotamiento de los combustibles fósiles, especialmente el petróleo y gas natural.

Teniendo en cuenta la estrecha relación entre la futura utilización del hidrógeno, y la situación energética mundial, se ha considerado pertinente discutir brevemente dicha situación.

1.1 *La matriz energética Argentina*

La matriz energética argentina es altamente dependiente del consumo de hidrocarburos, sobre todo de gas. El 34,7% de la oferta interna de energía primaria se obtiene a partir de petróleo, y un 51,3% a partir de gas natural (según datos obtenidos de la Secretaría de Energía de la Nación).

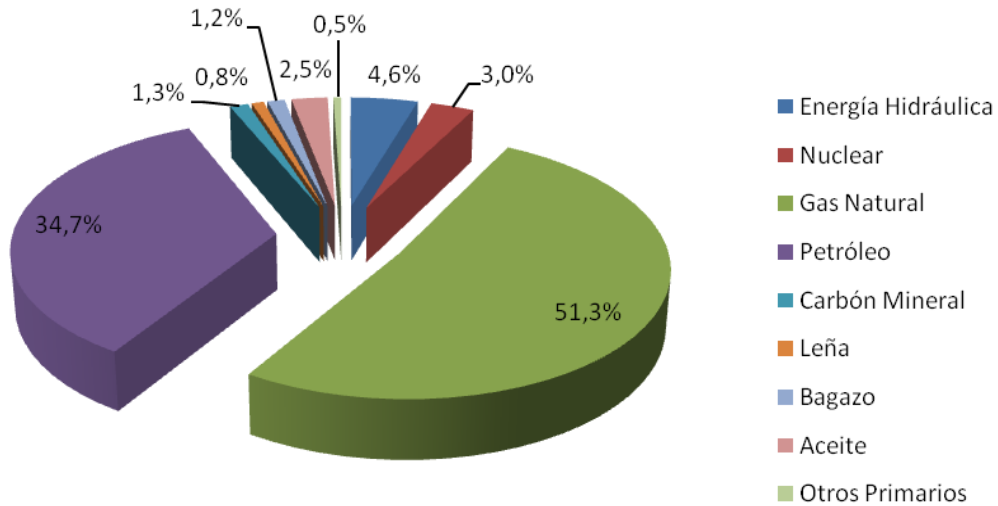
Oferta interna de fuentes primarias de energía en la República Argentina, expresada en kTEP (miles de toneladas equivalentes de petróleo) para el año 2010

	kTEP	%
Energía Hidráulica	3.540	4,6%
Nuclear	2.289	3,0%
Gas Natural	39.064	51,3%
Petróleo	26.411	34,7%
Carbón Mineral	976	1,3%
Leña	644	0,8%
Bagazo	918	1,2%
Aceite	1.909	2,5%
Otros Primarios	416	0,5%
Total	76.167	100%

En Otros Primarios, se contabiliza la energía aprovechada de:

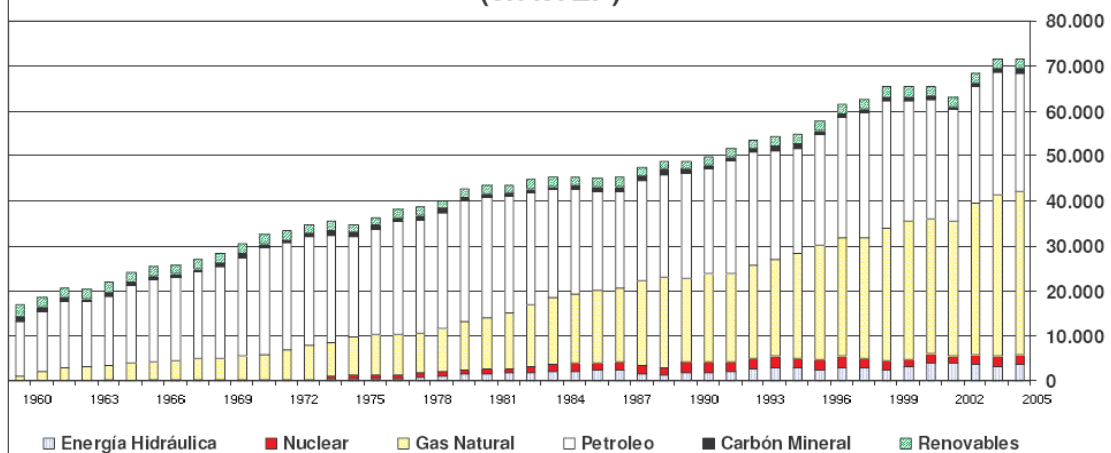
- Energía Eólica, para la generación de Energía Eléctrica (aerogeneradores)
- Energía Eólica, para el bombeo de agua (molinos de viento)
- Energía Solar
- Cáscaras de Girasol
- Licor Negro
- Marlo de Maíz
- Cáscara de Arroz
- Biodiesel
- Residuos Pecuarios

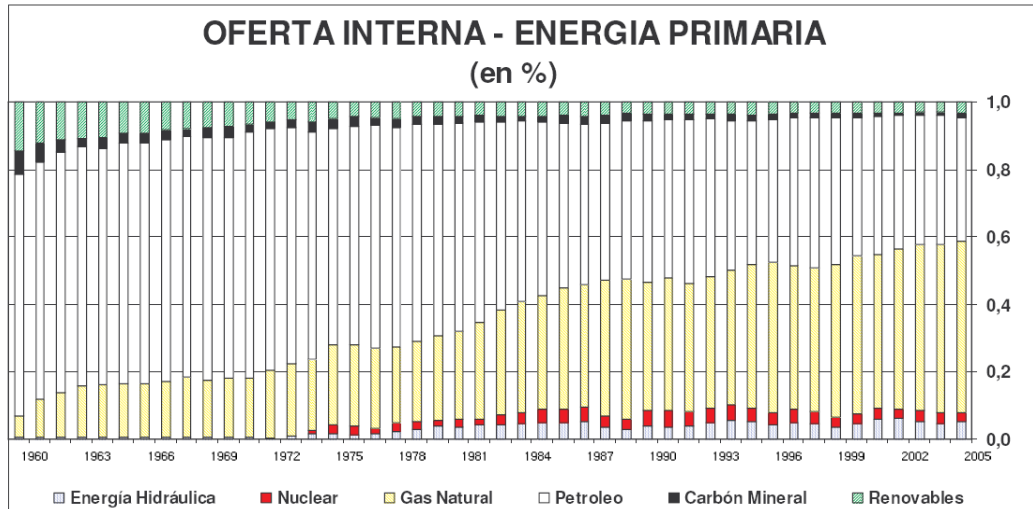
Oferta interna fuentes primarias de energía Argentina 2010



Datos obtenidos del balance energetico 2010 de la Secretaria de Energía de la Nación

OFERTA INTERNA - ENERGIA PRIMARIA (en kTEP)





A partir de la década del 70 comienza un importante proceso de sustitución en el consumo de energéticos en nuestro país, pasando de una matriz con una gran utilización de combustibles líquidos a una con gran utilización de gas. Al respecto se expresaba Daniel Cameron, Secretario de Energía de la Nación, en la inauguración de la Argentina Oil and Gas el 11 de octubre de 2011:

“En el tiempo este proceso llevó a la Argentina a constituirse en el segundo país más gasificado del mundo, detrás de Rusia, lo cual nos ha convertido en un país más limpio desde el punto de vista de la producción de gases de efecto invernadero (el sector energético es responsable del 32% del CO₂ que produce nuestro país) y muy competitivo desde el punto de vista de los costos energéticos tanto para el habitante común como para los sectores industriales, de generación de Energía Eléctrica y el gas natural comprimido utilizado en una gran parte de la flota de vehículos del país (1.900.000)”

Si comparamos la matriz energética Argentina con la matriz energética mundial se observa una dependencia similar en el caso del petróleo, aunque no así en el del gas natural, que se reduce a menos de la mitad (51.3% en la matriz Argentina y 21.2% en el mundo).

Como se ve en el cuadro siguiente somos un país líder en el escenario mundial en materia de consumo de gas, que representa más de la mitad de nuestro consumo total energético, mientras en Brasil el gas representa apenas el 9 por ciento del consumo energético, en Estados Unidos el 27 por ciento y en Europa el 25 por ciento. Es cierto que Rusia depende más del gas que Argentina, pero hay una diferencia crucial, ya que Rusia tiene reservas gasíferas equivalentes a 76 años de consumo, mientras las nuestras caen mes a mes desde hace varios años, y hoy representan menos de 8 años de producción. El gas es muy importante en Argentina, ningún país del mundo tiene como nosotros más de 1,8 millones de vehículos que utilizan GNC, la generación eléctrica de origen térmica depende principalmente del gas, toda la industria



petroquímica utiliza el gas como insumo, mientras que las familias y las empresas utilizan principalmente el gas como fuente combustible y de calor.

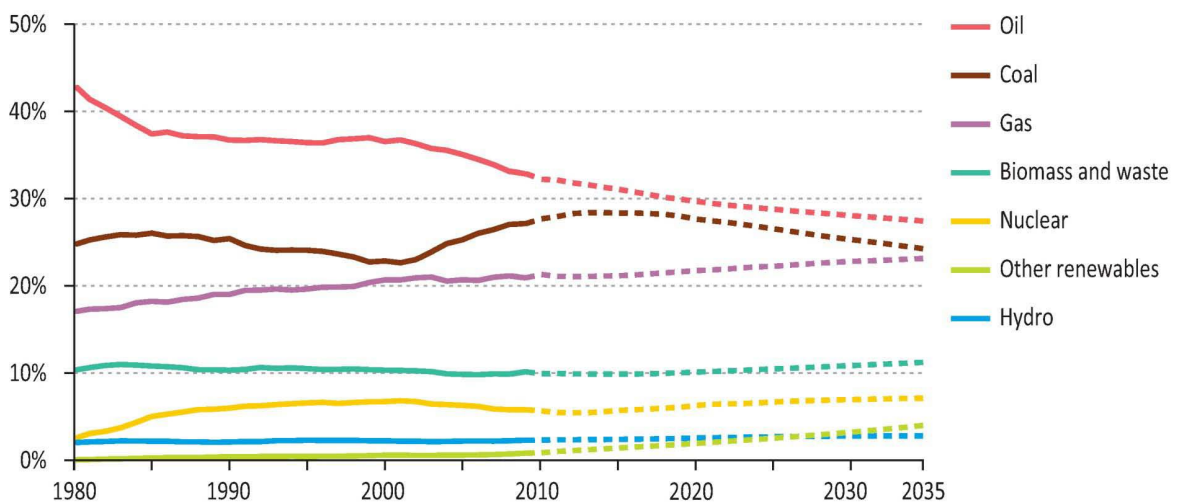
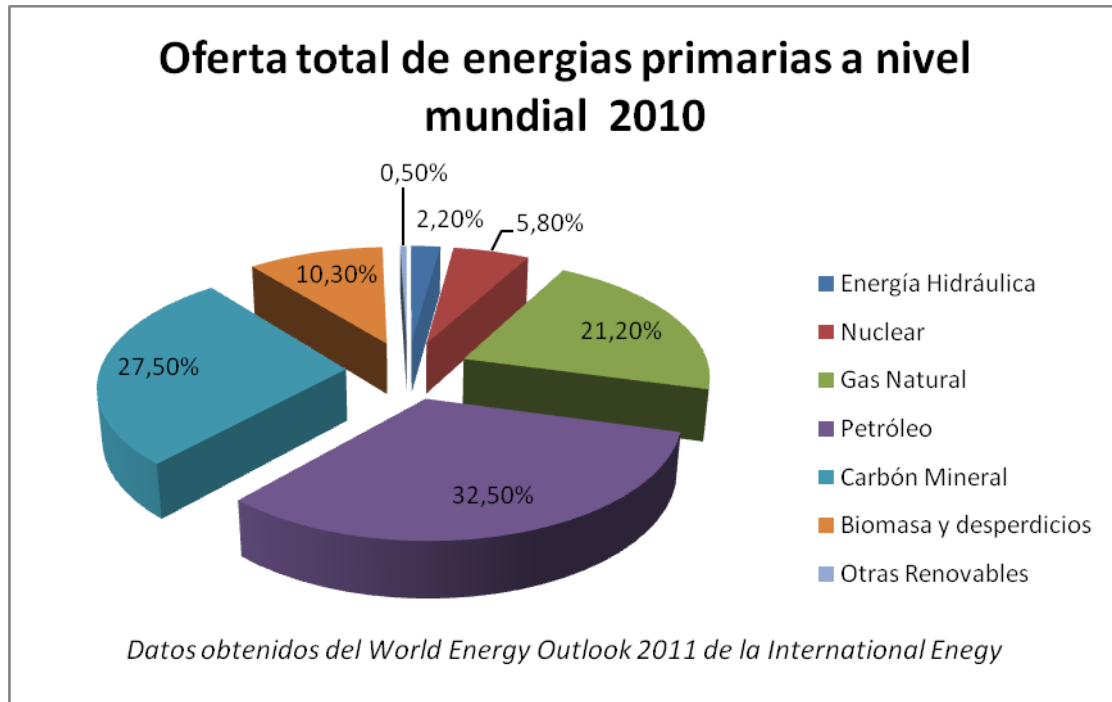
CONSUMO Y RESERVAS DE GAS EN EL MUNDO

País	% Consumo Gas	R/P (años)
Qatar	72	100 (+)
Argelia	63	56
Emiratos Árabes	63	100 (+)
Irán	58	100 (+)
Rusia	54	76
ARGENTINA	51	7,9
Ucrania	40	50
Holanda	39	17
Arabia Saudita	38	95
EEUU	27	13
Brasil	9	29

Como se aprecia en la tabla precedente, son varios los países en los cuales el gas es un insumo energético más importante que en nuestro país, pero nuevamente aparece una diferencia significativa: en todos ellos las reservas gasíferas son enormes, con duraciones superiores a los 50 años. Argentina es hoy un caso único en el mundo: muy alta dependencia del gas (51 por ciento del consumo total energético) y escasas reservas inferiores a 8 años de consumo.

En cuanto a otras fuentes, vale la pena destacar como datos favorables para la Argentina, la baja incidencia del carbón mineral, que es el combustible fósil más contaminante y a nivel mundial representa más de la cuarta parte de la oferta, y de la energía nuclear, cuya participación proporcional se reduce a la mitad en nuestro país.

Distribución porcentual de la oferta de energías primarias a Nivel Mundial (2010)	
	%
Energía Hidráulica	2,20%
Nuclear	5,80%
Gas Natural	21,20%
Petróleo	32,50%
Carbón Mineral	27,50%
Biomasa y desperdicios	10,30%
Otras Renovables	0,50%
Total	100%

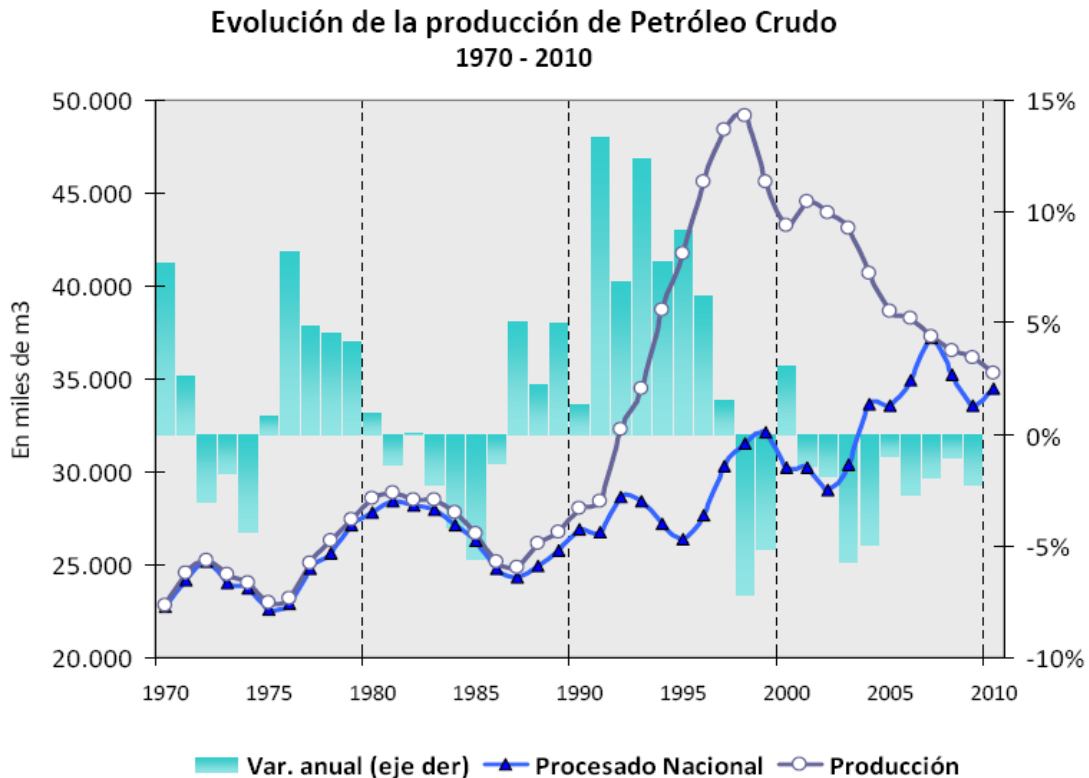


Tendencia para la demanda de energías primarias a nivel mundial considerando un escenario de nuevas políticas, favorables a reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

1.1.1 Evolución de la producción de hidrocarburos en Argentina

En la década del '90, la extracción de petróleo evidenció un fuerte crecimiento, muy por encima del registrado por el consumo interno, lo que determinó la generación de

importantes excedentes exportables. Tales ventas externas no fueron acompañadas por inversiones en exploración por parte del capital privado, lo que trajo aparejado una caída en la producción. Desde 2003 (con excepción de 2008 y 2009 por la crisis internacional), el procesamiento mostró un importante crecimiento, alcanzando en 2007 su máximo histórico.

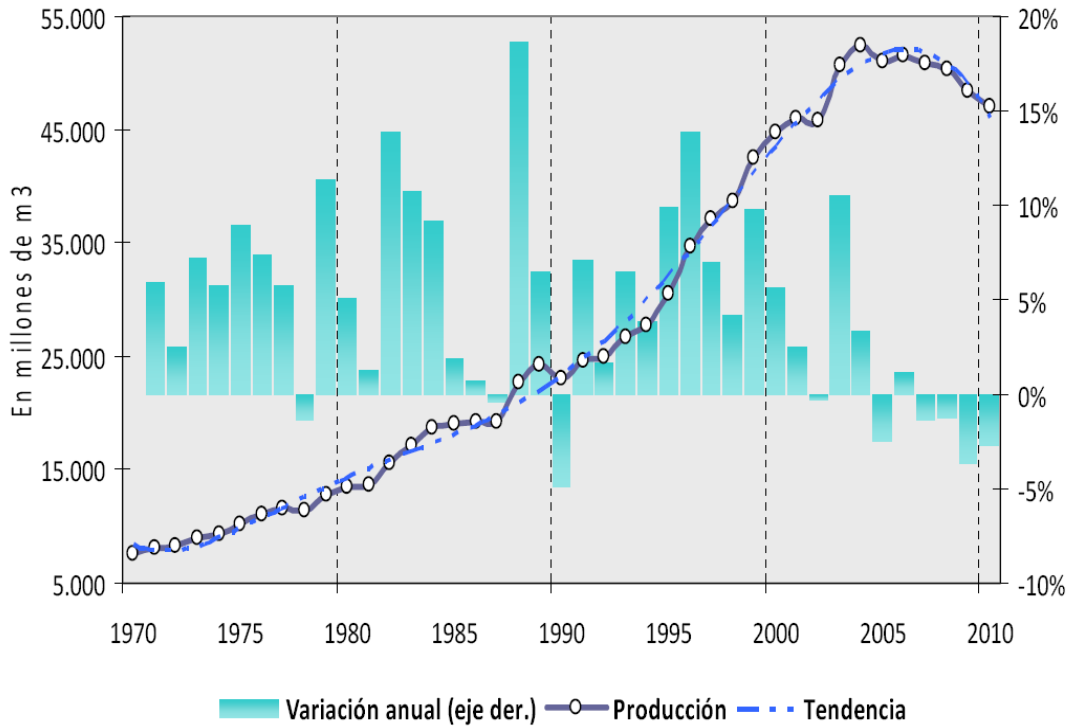


En cuanto al gas, desde fines de la década del '70, ha tenido una incidencia creciente en la oferta energética del país, representando actualmente más del 50% del total, guarismo muy por encima del promedio mundial, que se encuentra cercano al 20%.

En este contexto, se profundizó la importancia del gas en la matriz energética debido, principalmente, al consumo intensivo en centrales eléctricas y, en menor medida, por los incrementos en los consumos vehiculares, industriales y domiciliarios.

Hasta el año 2004, la producción creció en forma sostenida, alcanzando su máximo histórico de 52.310 millones de m³. Entre 2005 y 2010, la producción decreció parcialmente.

Evolución de la producción de Gas Natural. 1970 - 2010



1.1.2 Evolución de las reservas de hidrocarburos en Argentina

La Secretaría de Energía de la Nación publicó en enero de 2012 los datos de reservas de hidrocarburos correspondientes al 31 de diciembre de 2010. Estos datos dan cuenta de la persistencia en la caída de las reservas de hidrocarburos, fenómeno que se observa ininterrumpidamente en nuestro país desde el año 2000 en el caso del gas natural, y desde 1999 en el caso del petróleo, cuyas reservas comprobadas también cayeron en todo el período, exceptuando una recuperación en 2006.

Las reservas comprobadas de gas natural disminuyeron entre 2009 y 2010 en un 5,3%, y acumulan una caída del 53% en los últimos diez años. Por su parte, las reservas comprobadas de petróleo se incrementaron entre 2009 y 2010 en 0,5%, habiendo caído en los últimos 10 años un 12%. Como resultado, las reservas comprobadas totales (en Toneladas Equivalentes de Petróleo) se redujeron entre 2001 y 2010 un 38%.

Variación de las reservas comprobadas de hidrocarburos – 2001-2010

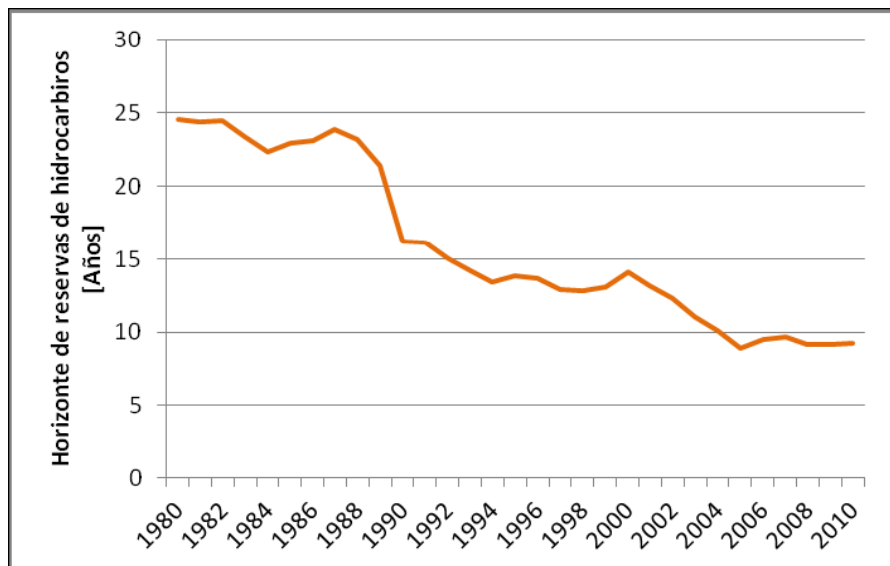
	2001	2009	2010	Variación 2001-2010 [%]	Variación 2009-2010 [%]
Reservas Comprobadas de gas natural [MMm3]	763.526	378.820	358.726	-53%	-5,30%
Reservas Comprobadas de petróleo [Mm3]	457.674	399.296	401.308	-12%	0,50%
Total[MTEP]	1.066	679	663	-38%	-2,30%

Elaboración Instituto Argentino de la Energía "General Mosconi"
Fuentes: Secretaría de Energía

Evolución de las reservas comprobadas de hidrocarburos [Miles de TEP] – 2001-2010



Evolución del horizonte de reservas comprobadas totales de hidrocarburos (R/P) [Años] – 1980-2010



Según el Balance Energético Nacional 2010, publicado por la Secretaría de Energía, el gas natural, como fuente de energía primaria, tuvo en Argentina en ese año una participación del 51% en la oferta interna, seguido por el petróleo, cuya participación fue del 35%.

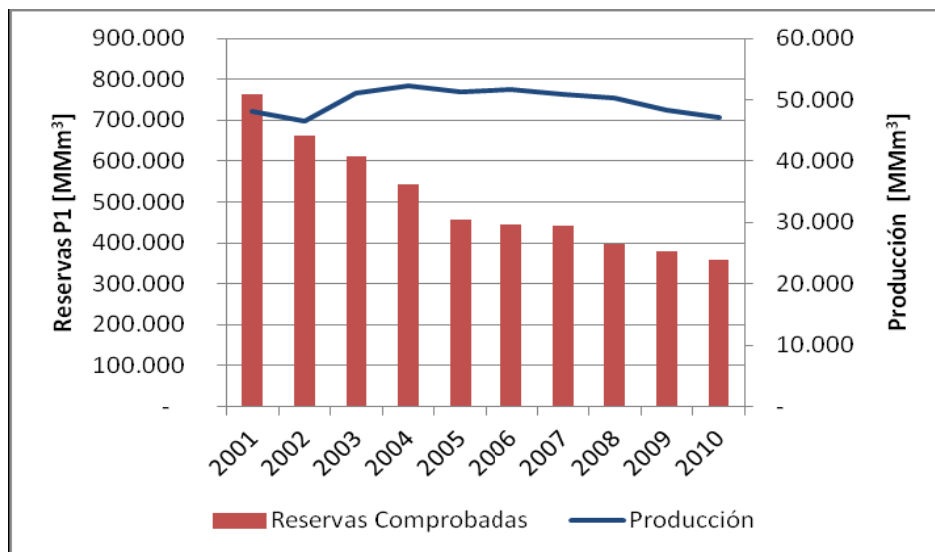
Las reservas comprobadas de gas natural eran, al 31 de diciembre de 2010, de 358.726 millones de metros cúbicos, es decir, menores a la mitad de las reservas comprobadas diez años antes. Esta caída, de 404.800 MMm³, equivale a 103 meses al ritmo de producción de 2010.

A pesar de la persistente caída en la producción de gas que se da desde el año 2004, que entre 2009 y 2010 disminuyó en 2,7%, las reservas cayeron 5,3% entre esos años. En este contexto, la disminución en las mismas no puede ser atribuida a un aumento de la producción.

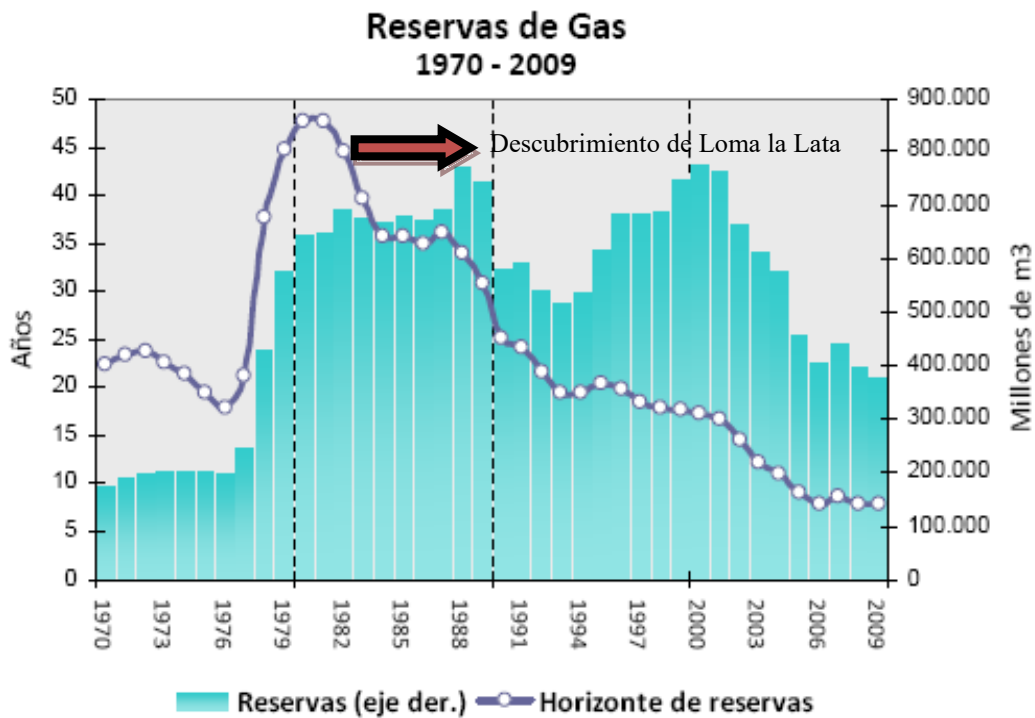
Variación de las reservas comprobadas y producción de gas natural – 2001-2010

	2001	2009	2010	Variación 2001-2010 [%]	Variación 2009-2010 [%]
Reservas Comprobadas de gas natural [MMm ³]	763.526	378.820	358.726	-53%	-5,30%
Producción de gas natural [MMm ³]	48.131	48.419	47.109	-2%	-2,70%
Horizonte de reservas [Años]	15,9	7,8	7,6	-52%	-2,70%

Evolución de las reservas comprobadas y producción de gas natural – 2001-2010



Debido a que las reservas comprobadas de gas natural han caído a un ritmo mayor que la producción, el horizonte de reservas también ha disminuido, hasta situarse en 7,6 años: un valor menor que la mitad al correspondiente en 2001.



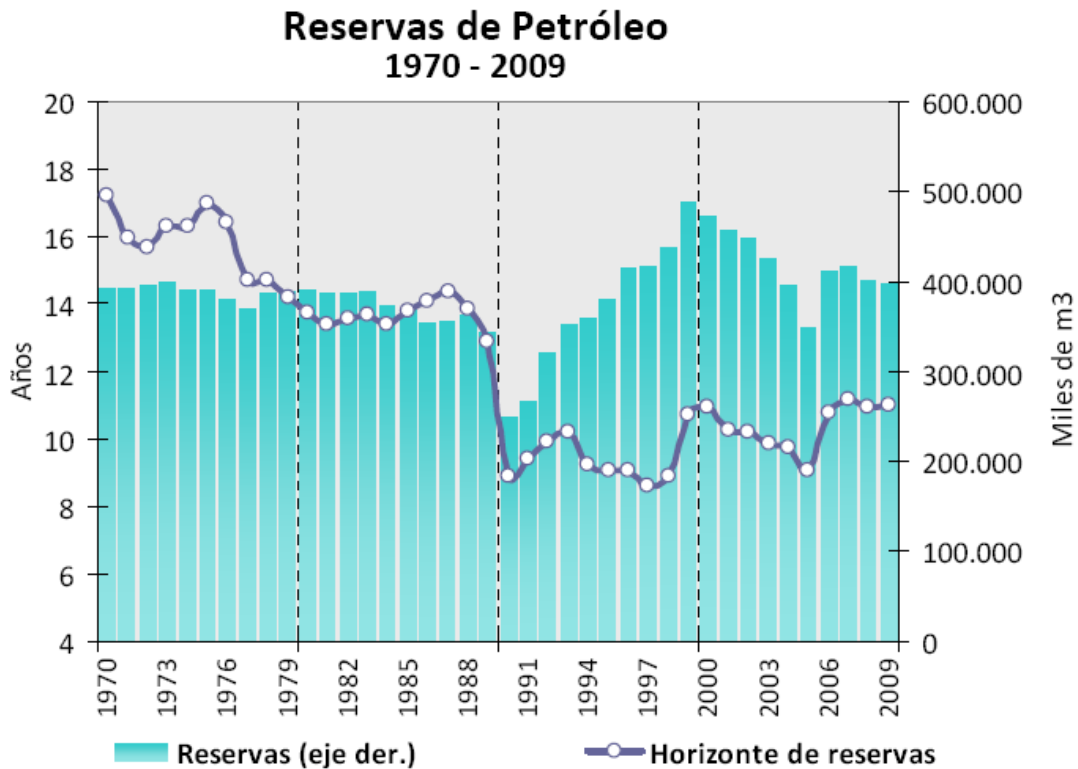
Las reservas comprobadas de petróleo, fuente que según el Balance Energético Nacional representó el 35% de la energía primaria de la Argentina en 2010, eran al 31 de diciembre de dicho año de 401.308 miles de metros cúbicos; 0,5% más que las disponibles al final de 2009, y 12% menos que al 31 de diciembre de 2001.

En cuanto a la producción, ésta cayó un 2,2% entre 2009 y 2010, y un 21% entre 2001 y 2010, siguiendo una tendencia que se da desde el año 1998, y que continuó en 2011. En 2010 se produjo un 21% menos de petróleo que en 2001.

	2001	2009	2010	Variación 2001-2010 [%]	Variación 2009-2010 [%]
Reservas Comprobadas de petróleo [Mm³]	457.674	399.296	401.308	-12%	0,50%
Producción de petróleo [Mm³]	44.578	36.151	35.365	-21%	-2,20%
Horizonte de reservas [Años]	10,3	11	11,3	11%	2,70%

El horizonte de reservas de petróleo se mantiene estable desde 2006, en torno a los 11 años. En 2010 este valor era de 11,3 años, tres meses más que a fines de 2009. Sin

embargo, debe tenerse en cuenta que ésta aparente estabilidad se da en el contexto de producción decreciente mencionado anteriormente.

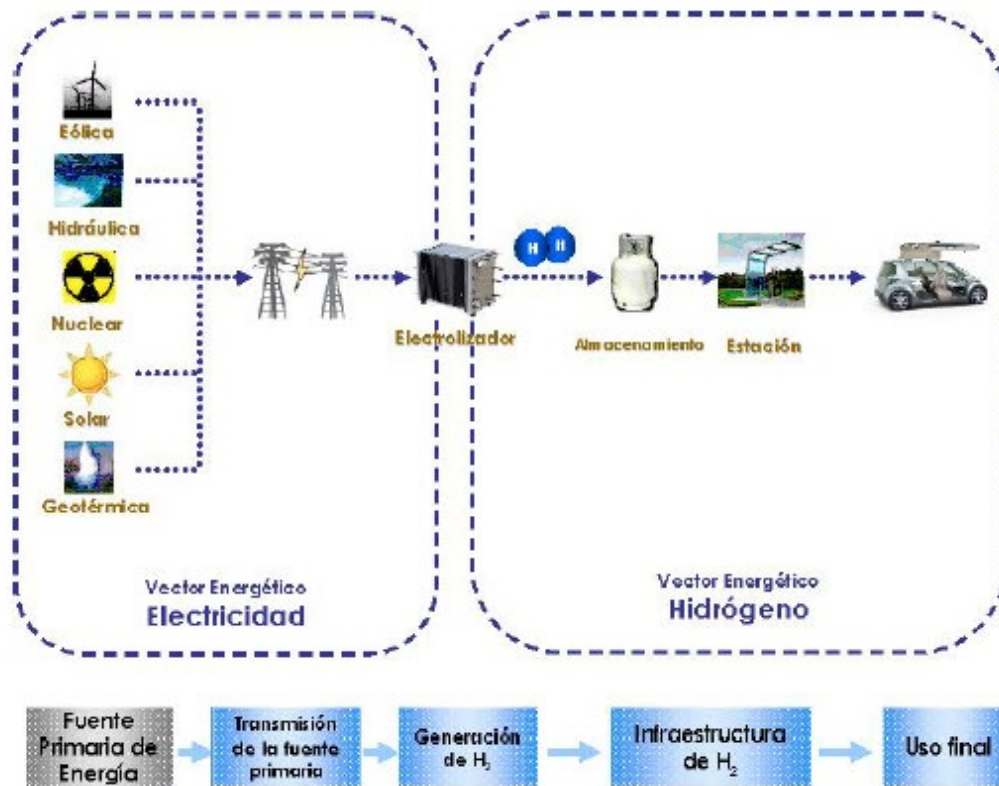


1.2 *El hidrógeno como vector de energía*

Se denomina vector energético a aquellas sustancias o dispositivos que almacenan energía, de tal manera que ésta pueda liberarse posteriormente de forma controlada. Se diferencian de las fuentes primarias de energía en que, a diferencia de éstas, se trata de productos manufacturados, en los que previamente se ha invertido una cantidad de energía mayor para su elaboración.

Ejemplos típicos de vectores energéticos son las baterías, las pilas, condensadores, el hidrógeno, el agua contenida en una represa, aunque existen multitud de variantes más, como los volantes inerciales, o incluso depósitos de aire comprimido o resortes.

El hidrógeno es el vector energético que más atención está acaparando, postulado como posible candidato para sustituir al petróleo como combustible en automovilismo. Sin embargo, el hidrógeno, por su carácter de vector energético, sólo puede ser considerado limpio si proviene a su vez de fuentes de energía limpias.



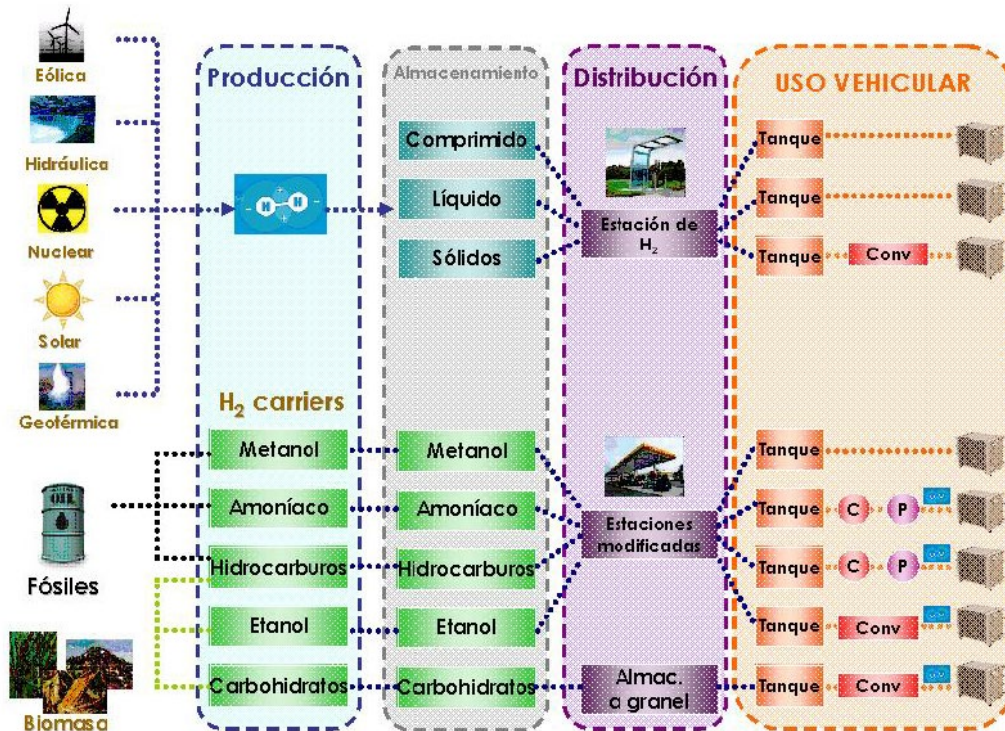
La fuente de energía primaria para producir hidrógeno podría ser combustible nuclear, o fósil. En una economía completa del hidrógeno, incluso las fuentes eléctricas primarias como la energía hidráulica y la energía eólica se podrían utilizar para hacer el hidrógeno, en vez de distribuirla directamente en la red eléctrica (el equilibrio apropiado entre la distribución del hidrógeno y la distribución eléctrica interurbana es una de las preguntas básicas a medio resolver en la economía del hidrógeno). Los grandes generadores que produjesen hidrógeno de fuentes de energía fósiles generarían cantidades enormes de contaminación, pero centralizan las emisiones, y las ciudades quedarían limpias de polución, ya que las emisiones se podrían realizar en zonas despobladas, y los sistemas de control de emisión serían más fáciles de examinar.

Se aduce que la quema de combustibles fósiles en centrales grandes es más eficiente que en automóviles o pequeñas centrales, (casi el 60% en las modernas centrales de ciclo combinado frente al 40% de un motor a nafta o un 45% en los motores diesel de autotransporte y hasta 54% en grandes motores Diesel marinos) sin embargo, hay que tener en cuenta que la eficiencia en la obtención de hidrógeno a partir de electricidad



está actualmente en un 30,5% y la eficiencia de una pila de combustible en un 60,4% con lo que quemar combustible fósil en un motor diesel tiene una eficiencia del 45%, mientras que quemar combustible fósil en una central, para generar electricidad, para generar hidrógeno, para emplearlo en una pila de combustible, tiene una eficiencia final, sin contar las pérdidas por transporte, no superior al 12%. Esto obligaría a quemar casi cuatro veces más combustibles fósiles para el mismo trabajo, lo que anularía las ventajas ambientales de centralizar las emisiones, y sin duda encarecería enormemente el precio de la energía.

No siendo el hidrógeno una fuente de energía, sino un vector energético, su impacto medioambiental dependerá de la fuente de energía empleada para su obtención. A fecha de 2010, aproximadamente el 95% de la producción del hidrógeno se realiza a través de la quema de combustibles fósiles, y por tanto manteniendo las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Solo en torno a un 5% de la producción de hidrógeno se realiza a través de la electrólisis, es decir, de la separación del hidrógeno que contiene el agua mediante energía eléctrica. Este método es menos eficiente que la utilización directa de la electricidad, pero permite el almacenamiento de la energía, lo que presenta grandes ventajas, como la posibilidad de seguir generando energía aunque no haya demanda en ese momento, y de recuperarla en momentos de escasez. Si la electricidad utilizada para la electrólisis proviene de fuentes renovables como la eólica o la solar, el hidrógeno será un vector energético con muy bajas emisiones de gases de efecto invernadero.



1.3 *Estado actual de la tecnología relacionada al hidrógeno*

En el mundo

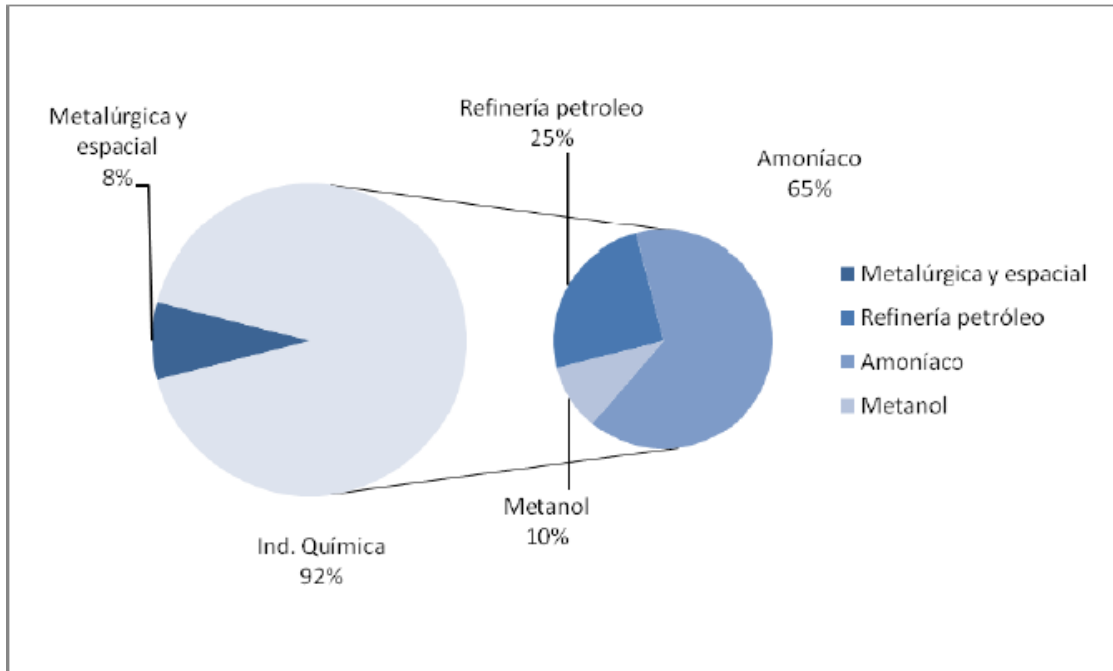
Algunas compañías, como Honda, DaimlerChrysler, Ford Motor Company, General Motors Corporation/Opel, Hyundai Motor Company, Kia Motors Corporation, la alianza Renault SA y Nissan Motor Corporation y Toyota Motor Corporation están desarrollando proyectos relacionados con los vehículos de hidrógeno. Algunas de ellas incluso han apostado estratégicamente por un futuro energético basado en las tecnologías de hidrógeno, una corriente que ha dado lugar al concepto de Sociedad del Hidrógeno, que a menudo se intercambia con el de economía del hidrógeno. Por ejemplo, el fabricante de automóviles japonés Honda, la única firma que ha obtenido la homologación para comercializar su vehículo impulsado por pila de combustible de hidrógeno, el FCX Clarity, en Japón y Estados Unidos, ha desarrollado también la Home Energy Station (HES), un sistema autónomo y doméstico que permite obtener hidrógeno a partir de energía solar para recargar vehículos de pila de combustible y aprovechar el proceso para generar electricidad y agua caliente para el hogar.



La firma alemana BMW ha desarrollado vehículos con motores de combustión interna con capacidad de utilizar hidrógeno sin perder la posibilidad de utilizar nafta como combustible. En este sentido cabe destacar que el uso de este combustible no es un simple sustituto de la nafta sino que a ciertas propiedades en el proceso de combustión, permiten optimizar el funcionamiento alcanzando notables rendimientos.

La producción del hidrógeno es un sector industrial considerable, y es cada vez mayor. En 2004 se produjeron unas 50 millones de toneladas métricas de hidrógeno, conteniendo 200 gigavatios de energía; la tasa de crecimiento es de alrededor de un 10% por año. Debido a que el almacenaje y transporte de hidrógeno es caro, la mayor parte del hidrógeno que se produce en la actualidad se hace localmente, y es utilizado inmediatamente, generalmente por la misma compañía productora. En 2005, el valor económico de todo el hidrógeno producido fue de aprox. 135 mil millones de USD por año.

Hoy en día existen dos principales aplicaciones para el hidrógeno. Más de la mitad se emplea para producir amoníaco (NH_3) mediante el proceso de Haber, el cual se utiliza sobre todo como fertilizante, directa o indirectamente. A causa de que la superpoblación mundial y la agricultura intensiva crecen, la demanda del amoníaco (y por tanto de hidrógeno) está creciendo. La otra mitad de la producción actual del hidrógeno se utiliza para convertir cadenas largas de hidrocarburos (que son la mayoría en el petróleo sin refinar) en fracciones más ligeras, convenientes para su uso como combustibles. Este último proceso se conoce como hydrocracking. Hydrocracking representa un área incluso de mayor crecimiento que la del amoníaco, los incrementos en los precios del petróleo animan a las compañías petroleras a extraer un material más pobre, como pueden ser arenas de alquitrán y pizarra de petróleo. A su vez, varias naves espaciales, como Atlantis, usaron hidrógeno como combustible en sus cohetes. El consumo total de hidrógeno en el mundo se estima en unos 45 millones de toneladas anuales, siendo EEUU el mayor consumidor (79%), seguido por Europa (14%) y Asia (7%) [2]. La distribución del consumo según el tipo de aplicación se muestra en la siguiente figura, en la cual se puede apreciar que el 92% corresponde a la industria química. De este porcentaje, la mayor aplicación reside en la industria de la síntesis del amoníaco, seguida por la refinería de petróleo y la síntesis del metanol.



Actualmente, el 48% de la producción de hidrógeno es a partir del gas natural, el 30% del petróleo, y el 18% del carbón; la electrólisis del agua representa solamente un 4%.

Desarrollo de vehículos a hidrógeno

El primer desarrollo de un motor de combustión interna funcionando con hidrógeno como combustible data de 1807, se trata del motor del inventor Isaac De Rivaz, que utilizaba gas hidrógeno como combustible y bujías para el encendido.

Las más importantes compañías fabricantes de automóviles no están ajenas a la probabilidad de una futura economía de hidrógeno. Al parecer creen que una economía de hidrógeno es una solución factible a la alta emisión de CO₂ al ambiente. Por eso gastan gran cantidad de dinero en el desarrollo de prototipos que utilicen ésta fuente de energía. La tecnología para hacer funcionar autos en base a hidrógeno ya existe, sin embargo hasta ahora el mayor problema que existe es su alto costo y su baja autonomía. A continuación se presenta un breve resumen del desarrollo de algunos de éstos vehículos de parte de las compañías automotrices.

- BMW
A diferencia algunos competidores, BMW no plantea el uso de celdas de combustible para impulsar motores eléctricos que a su vez muevan el vehículo, sino que pretende seguir usando

un motor de combustión interna que conserve los elementos tradicionales de manejo que los clientes aprecian. El uso de las celdas de combustible también es parte de la propuesta de BMW, sin embargo las mismas se usan para complementar a la red de consumidores eléctricos de la red de a bordo del vehículo y no para generar corriente eléctrica destinada a la propulsión del automóvil. Sus investigadores creen que utilizar una pequeña pila de combustible para generar la energía eléctrica para la red de a bordo junto con el motor de combustión interna es el escenario más efectivo en costo para el lanzamiento de la tecnología. BMW sostiene en todos sus modelos, tanto en prototipos como los de fabricación en serie, el uso de motores de combustión interna preparados para funcionar tanto con hidrógeno líquido como con nafta común, con solo accionar un botón desde el habitáculo, de la misma manera que funcionan los motores con GNC actuales.

En el año 2000 presentó su modelo 750 hL, el primer automóvil propulsado a hidrógeno fabricado en serie en todo el mundo. El vehículo va equipado con un motor ambivalente de doce cilindros propulsado a hidrógeno y nafta. Rinde una potencia de 204 CV, y tiene una aceleración de 0 a 100 km/h en 9,6 segundos, alcanzando una velocidad máxima de 226 km/h. cuando el motor es alimentado con hidrógeno, el vehículo dispone de una autonomía de unos 350 kilómetros, gracias a los 140 litros de capacidad de su tanque criogénico en el que se almacena el hidrógeno.

Si llegara a agotarse el hidrógeno y no hubiera una estación de servicio cercana, el vehículo cambiaría automáticamente al sistema de combustión convencional, utilizando nafta como combustible, almacenada en un segundo tanque, y que le proporcionaría unos cientos de kilómetros de autonomía adicionales. La única diferencia, en el ámbito de la aspiración, respecto al motor convencional a nafta del mismo modelo, es la adopción de inyectores adicionales para la admisión del hidrógeno. La fabricación del modelo propulsado a hidrógeno fue plenamente integrada en el proceso normal de producción.

A continuación se ofrece un cuadro comparativo en el que se pueden observar las diferencias de prestaciones de dicho modelo respecto a su homólogo propulsado por nafta.

Motor	BMW 750iL	BMW 750hL
Combustible	Nafta súper	Hidrógeno
Número y disposición de cilindros	12 en V	12 en V
Cilindrada (cm ³)	5379	5379
Potencia máxima (CV/rpm)	243	204
Rendimiento		
Velocidad máxima (km/h)	250	226
Aceleración 0 – 100 km/h (segundos)	6,8	9,6
Aceleración 0 – 1000 m (segundos)	26,7	26,1

El hidrógeno se mantiene en forma criogénica (ultracongelado y líquido), a una temperatura de -253 grados centígrados, dentro de un tanque de acero de pared doble que se ubica detrás del respaldo trasero. En caso de haber una sobrepresión excesiva, dos válvulas de seguridad garantizan una ventilación controlada. Estas piezas también forman parte de un concepto integral de seguridad, probado en numerosos test de choque. Incluso en los accidentes sumamente violentos, donde el tanque se ve afectado en su área protegida, el cilindro de acero (con doble cubierta de 2 mm) no pierde su absoluta estanqueidad. Las deformaciones más pronunciadas en el vehículo, aquellas que casi no dejan posibilidad alguna de supervivencia a

sus ocupantes, pueden provocar fugas en el tanque, aunque el mismo no habrá de explotar: para ello debería producirse una mezcla de hidrógeno y aire, pero el aire es incapaz de penetrar en el tanque debido a la mayor presión interna del hidrógeno.

Más recientemente (marzo de 2007) BMW ha presentado su nuevo modelo Hydrogen 7, construido sobre la base de la actual serie 7, perteneciente al segmento de las berlinas de lujo. Al igual que su antecesor, el Hydrogen 7 dispone de un motor ambivalente a nafta e hidrógeno, de 12 cilindros en V y equipado con sistema de inyección electrónica. Su cilindrada total es de 5972 cm³, rinde una potencia máxima de 260 CV a 5100 revoluciones por minuto, y un par máximo de 390 Nm a 4300 revoluciones por minuto.

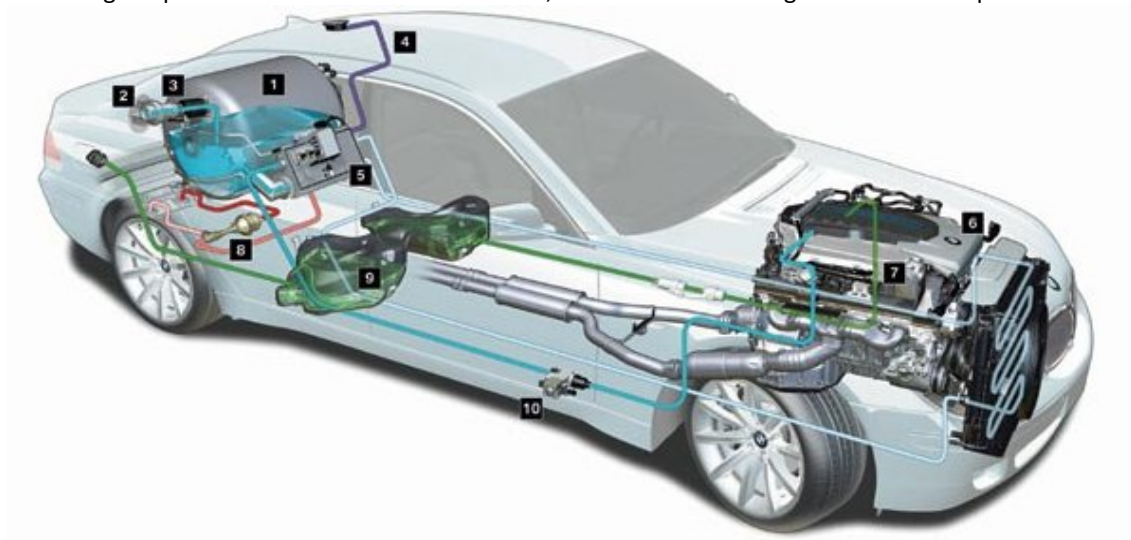
Considerando sus dimensiones, ofrece unas prestaciones nada despreciables, como una aceleración de 0 a 100 km/h en 9,5 segundos, un consumo medio de 13,9 litros/100 km con nafta y de 13,3 litros/100 km con hidrógeno.

Cuenta con dos depósitos de combustible, uno de nafta con una capacidad de 74 litros, y otro para el hidrógeno, de 8 kg de capacidad. Con el depósito de hidrógeno lleno dispone de una autonomía de 200 km, a los que se debe sumar 500 km más con el tanque de nafta lleno.

Casi al mismo tiempo, BMW también presentó el H2R, un prototipo concebido y desarrollado en sólo 10 meses, que ha establecido nueve récords mundiales de velocidad.

El H2R tiene un motor de 6.0-litros V-12, que genera 232 caballos de fuerza, con el que ha podido alcanzar una velocidad máxima de más de 187,62 mph (302 km/h).

La carrocería está hecha de aluminio y parte del chasis es de fibra de carbono reforzado con plástico. En cuanto a sus dimensiones, tiene 5,40 metros de largo, 2,01 metros de ancho y 1,34 metros de altura. El peso del vehículo incluyendo el conductor es de 1560 kg. Este prototipo, al igual que los otros modelos mencionados, también utiliza hidrógeno en estado líquido.



1. Tanque de hidrógeno líquido, 2. Aislación del tanque, 3. Boca de carga. 4. Sistema de descarga de emergencia, 5. Intercambiador de calor – Unidad de control. 6. Motor 7. Múltiple de admisión – Sistema de inyección. 8. Control de hidrógeno gasificado. 9. Tanque de Nafta. 10. Unidad de control de presión.



- FORD

Hay dos formas en que el hidrógeno se puede utilizar como combustible para vehículos y Ford se encuentra apostando e investigando activamente las dos. Ford está considerando el motor de combustión interna alimentado con hidrógeno, o H2ICE en su jerga, como el puente entre los actuales vehículos alimentados con nafta y los futuros vehículos impulsados eléctricamente con celdas de combustible.

El actual Ford Focus FCV-Hybrid, es la tercera generación de prototipos Ford a celdas de combustible. Es una variación del tradicional Focus que posee un motor eléctrico alimentado por una pila de Ni-MH de alto voltaje y por celdas de combustible. Los componentes del Ford Focus Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle, que la compañía piensa lanzar de forma oficial en 2015, son: una celda de Combustible con 440 celdas, un tanque de Hidrógeno de 5.000 psi de presión capaz de almacenar cuatro kilos, un motor eléctrico de 65 Kw (85 hp y 170 lb-pie de torque), una transmisión de una sola velocidad, una batería Ni-MH Sanyo y frenos regenerativos.

En cuanto a motores de combustión interna a hidrógeno, un campo en el que Ford ha invertido enormes recursos, han desarrollado algunos modelos que incluso son más eficientes en sus versiones de hidrógeno que a nafta.

El Ford Model U es uno de ellos, cuyo motor está basado en otro modelo de Ford de 2,3 litros de cilindrada y cuatro cilindros, utilizado en la Ford Ranger, la versión europea del Ford Mondeo y en un gran número de vehículos Mazda (marca de la cual Ford es propietaria). Para lograr dicho rendimiento, se ha realizado la refrigeración pertinente del aire de admisión y el motor se ha sobrealimentado mediante un compresor centrífugo que es capaz de añadir una presión de 1 atmósfera aproximadamente a la ya de por sí aumentada (respecto al modelo a nafta) relación de compresión de 12,2:1. Además, para optimizar el quemado del hidrógeno, se utilizan inyectores especialmente diseñados para este fin, estrangulador electrónico y un nuevo software de control diseñado específicamente para este motor.

Ford ha aprovechado el amplio margen de concentraciones que proporcionan una buena inflamabilidad al hidrógeno para poder hacer trabajar al motor en condiciones cercanas a las óptimas a muy diferentes regímenes de giro, de tal manera que la eficiencia se ha incrementado hasta valores del 38% (25% más que en el caso del mismo motor alimentado con nafta).

Ford tiene un par de proyectos piloto en marcha con vehículos H2ICE. Uno de ellos ha puesto 30 colectivos E-450 en las calles de EE UU y Canadá, los cuales son monitoreados electrónicamente en tiempo real. Hasta ahora, Ford ha expuesto que estos vehículos han llegado a una performance un 13% mayor a la de los mismos motores funcionando con nafta, con la ventaja adicional de producir emisiones contaminantes insignificantes debido al quemado de lubricantes. Ford también lanzó un prototipo, la F-250 Súper Chief, que puede funcionar con nafta, etanol o hidrógeno.

- GM

General Motors posee múltiples modelos de prototipos a celdas de combustible. El Chevrolet Sequel posee un motor eléctrico alimentado por celdas de combustibles de hidrógeno. Éste es almacenado en forma de gas comprimido. Logra una aceleración de 0-100 km/h en 10 segundos y una autonomía de 300 millas (aproximadamente 500 km). Además posee el sistema



conceptual by-wyre que reemplaza los sistemas mecánicos e hidráulicos de conexión de los autos convencionales por un sistema electrónico.

El HydroGen3, prototipo creado sobre la base del Zafira, es propulsado por un motor eléctrico alimentado por celdas de combustible de hidrógeno. Éste es almacenado como gas comprimido o como gas licuado. Su autonomía en el primer caso es de 270 km y en el segundo de 400 km.

- **HONDA**
Honda anunció el año 2006 que el 2008 se comenzará a comercializar su conceptual FCX a celdas de combustible de hidrógeno. Éste vehículo alcanza una velocidad máxima de 160 km/h y tiene una autonomía de 570 km. El motor tiene una potencia de 95 kW. En este conceptual el hidrógeno es almacenado en la forma de gas comprimido.
- **HYUNDAI**
Hyundai desarrolló el Tucson FCEV, conceptual que es alimentado por celdas de combustible de hidrógeno. Tiene una autonomía de 300 km y logra una velocidad máxima de 150 km/h.
- **MAZDA**
Mazda lleva ya 20 años trabajando en motores de hidrógeno, y fue en el Salón de Tokio de 2003 cuando presentó un prototipo del deportivo RX-8 que podía funcionar bien con nafta o bien con hidrógeno. Con la misma base y carrocería, y con un motor con algunos cambios que le permitan tolerar ambas fuentes de energía, el Mazda RX-8 Hydrogen RE está listo para que en el momento que las infraestructuras lo permitan se lance en todos los mercados como cualquier otro modelo de producción.

Para cambiar de un modo a otro el conductor dispone de un simple botón en el tablero. Funcionando con nafta el Mazda RX-8 Hydrogen RE desarrolla 210 CV de potencia y 222 Nm de par, pudiendo recorrer 550 kilómetros gracias a su depósito de nafta de 61 litros. Pasando a modo hidrógeno, la potencia máxima es de 109 CV y el par de 140 Nm, por lo que se puede circular con bastante agilidad. Su tanque de hidrógeno de 110 litros le da una autonomía de 100 kilómetros. Por tanto, en total este deportivo puede recorrer 650 kilómetros llevando los dos tanques llenos.



- **DAIMLER/CHRYSLER**
Desde 2003, DaimlerChrysler ha estado probando y mejorando su prototipo Mercedes-Benz clase A F-Cell. Éste vehículo tiene un motor eléctrico alimentado por celdas de combustible de hidrógeno. El motor eléctrico tiene una potencia de 65 kW. Acelera de 0 a 100 km/h en 16 segundos y llega a una velocidad máxima de 140 km/h. Su autonomía es de aproximadamente 150 km.

Estaciones de Servicio y Gasoductos

En Estados Unidos, Canadá y otros países desarrollados se están creando estaciones de servicio que expenden hidrógeno de forma experimental. Estas estaciones de servicio generan el hidrógeno in situ o el abastecimiento es mediante camiones o gasoductos desde lugares muy cercanos. Por el momento no se realiza transporte de largas distancias para el abastecimiento de este tipo de infraestructura.

Según datos entregados por el departamento de energía de Estados Unidos, en el segundo trimestre del año 2006 ya había 9 estaciones de servicio de hidrógeno para vehículos abiertos al público. Todas estas estaciones son de carácter experimental. Sin embargo existen en total más de 90 estaciones tanto para uso experimental de

empresas como para el uso público. Empresas como Shell, BP y Chevron ya tienen estaciones de servicio abiertas al público.



En Alemania, un conglomerado de grandes empresas como BMW, Aral, Ford, DaimlerChrysler, etc. formaron una asociación llamada Clean Energy Partnership, la cual se preocupa del desarrollo de las tecnologías del hidrógeno y tiene estaciones de servicio de hidrógeno al público.

En British Columbia, Canadá, una empresa llamada BC Hydro está construyendo la infraestructura necesaria para lograr crear una economía de hidrógeno en esa zona. La idea es tener la infraestructura lista para comenzar con el uso masivo de vehículos a hidrógeno. El plan contempla la creación de la infraestructura necesaria para poder vender de forma masiva el hidrógeno para su uso como combustible en los autos.

En cuanto a los gasoductos, el problema de transportar hidrógeno es su baja densidad de energía. Debido a esto hay que transportar mucho más hidrógeno que gas natural u otro combustible fósil para transportar la misma energía si se tiene en cuenta su volumen. En el caso de los gasoductos, al comparar con el gas natural, se necesitaría transportar 3,5 veces la cantidad de gas natural en hidrógeno para obtener la misma cantidad de energía. Esto hace que los gasoductos de hidrógeno tengan que tener



diámetros mucho mayores, lo que los hace más caros. Otro problema que se presenta al transportar el hidrógeno a través de gasoductos son los materiales de los cuales tienen que ser fabricados. El hidrógeno es muy corrosivo, por lo cual los gasoductos se tienen que hacer de materiales más sofisticados y costosos que para el gas natural. Además las presiones que deben soportar son mayores, lo cual también los hace más caros.

Celdas de Combustible

La primera Celda de Combustible fue construida en 1839 por Sir William Grove, un juez galés y honorable científico. El verdadero interés en celdas de combustible, como un generador práctico, no vino sino hasta comienzos de los años 1960's cuando el programa espacial de los Estados Unidos seleccionó las celdas de combustible en lugar del riesgoso generador nuclear y de la costosa energía solar. Fueron celdas de combustible las que proporcionaron electricidad y agua a las naves espaciales Gemini y Apollo.

Autos movidos a partir de celdas de combustibles se encuentran en una etapa temprana de desarrollo comparados con autos eléctricos movidos con baterías pero son considerados como una alternativa muy atractiva. Los primeros ofrecen las ventajas de un auto eléctrico provisto de baterías, pero pueden ser reabastecidos de combustible muy rápidamente y su rango de alcance es mayor que aquellos con baterías. Adicionalmente, autos con celdas de combustible producirían menos emisiones de gases que producen efecto invernadero (considerando las emisiones asociadas con la recuperación de la fuente primaria). Daimler-Benz ha concluido que los problemas técnicos fundamentales asociados al uso de celdas de combustible en autos pueden ser resueltos. Un estudio reciente de General Motors hizo notar que motores de autos con celdas de combustible podrían ser construidos casi por el mismo precio que los de combustión interna.

Algunas compañías ofrecen plantas de celdas de combustible por cerca de 3.000 dólares por kilowatt. A esos precios, dichas unidades son competitivas en nichos de mercado de alto valor o en áreas donde la electricidad es cara y el gas (GLP, natural) más barato.

En el país

La producción de H₂ en la Argentina se resume en la siguiente tabla. Las principales aplicaciones corresponden a la síntesis de amoníaco, a la fabricación de hierro esponja y a la síntesis de metanol. YPF tiene, en Lujan de Cuyo, una planta para la



hidrogenación de querosén para producir combustible para aviones conocido como JP. La industria de la alimentación usa el H₂ para producir margarina y existen también plantas productoras de gases especiales que suministran H₂ de elevada pureza.

Empresa	Localización	Producto final	Capacidad (t/año)	Producción de H ₂ (Nm ³ /h)
PROFERTIL	Bahía Blanca	Amoniaco, urea	690.000	7.000
PASA SA	Campana	Amoniaco, urea	115.000	1.145
Fábrica Militar	Río Tercero	Amoniaco	12.000	122
YPF	Ensenada	Metanol	25.000	3.600
YPF	Plaza Huinul	Metanol	400.000	57.500
Resinfor	Gral San Martín	Metanol	50.000	7.190
YPF	Lujan de Cuyo	JP		
SIDERCA	Campana	Hierro Esponja		70.200
SIDERAR	San Nicolás	Hierro Esponja		
AIR LIQUIDE		Gases especiales		
AGA		Gases especiales		

1.4 *Motivaciones y objetivos del proyecto*

La fuerte incidencia de los combustibles fósiles en la matriz energética argentina, la necesidad económica de las provincias de obtener 'recursos genuinos' avanzando hacia la profundización del modelo extractivo y la creciente demanda global de energía, son las variables que se imponen con más fuerza. Una vez más, los costos socioambientales de la explotación de yacimientos no convencionales han quedado fuera de la discusión por parte de los funcionarios de Estado y las empresas.



La producción energética nacional está en una fase de prolongado retroceso en el área de hidrocarburos, fruto de una acelerada descapitalización caracterizada por el agotamiento de las reservas, como consecuencia de políticas y decisiones de gobierno que han evidenciado en los últimos años su incompatibilidad con la preservación del autoabastecimiento. La producción cae, se achican las reservas y se evapora la inversión en exploración. En los próximos años el país tendrá que afrontar un escenario más exigente que el prevaleciente hasta el presente, ya que la fuerte descapitalización por rápido agotamiento de las reservas hidrocarburíferas previamente existentes requerirá de un gran esfuerzo en nuevas inversiones, al mismo tiempo el creciente desfasaje entre precios, tarifas y costos en todos los segmentos de la actividad energética, se convertirá en una cuestión de complejo manejo político de aquí en más. Desde el punto de vista institucional el prevaleciente modelo extractivo en el área del petróleo y del gas ha evidenciado su incapacidad para movilizar genuinos capitales de riesgo que expandan la frontera productiva, ya que su objetivo principal fue la captación de rentas petroleras y no la creación de nuevas rentas por incremento en las reservas aportadas por el esfuerzo inversor. El escenario se complica aún más cuando se observa que el precio internacional del petróleo no solo ha subido, sino que las perspectivas son de mantenimiento de altos precios en el futuro. Un escenario similarmente alcista se presenta también en el gas, según las recientes previsiones de la Agencia Internacional de Energía.

El escenario de disminución de la extracción y retraimiento de las reservas, sumado al crecimiento en la demanda de los últimos años, ha redundado en ingentes importaciones de combustibles –sobre todo de gas natural licuado, gasoil y fueloil-, que se han convertido en uno de los principales desequilibrios de la balanza comercial. De 2003 a 2010 las importaciones del rubro se incrementaron en prácticamente un 715%, pasando de US\$ 549 millones, a US\$ 4.474 millones.

La realidad actual nos dice que ya terminó un ciclo histórico de dos décadas caracterizados por energía abundante, barata y exportada. Lamentablemente ya comenzó un nuevo y muy distinto ciclo largo de energía escasa, importada y cara. Esta realidad nos indica que se han evaporado en los últimos años las exportaciones energéticas y han trepado sin pausa las importaciones. Por estas razones este año volveremos, después de más de 20 años, a tener déficit energético en la balanza de comercio exterior.

Señalemos además que esta pérdida del autoabastecimiento en hidrocarburos es particularmente grave en el caso del gas, por el hecho de que, como se expuso antes, nuestra matriz energética depende crucialmente del gas. Destaquemos el hecho que el país incrementó fuertemente el consumo de gas en las últimas décadas, pero las



reservas eran en el 2010 casi 40 por ciento menores a las de 1990. Las últimas cifras publicadas por la Secretaria de Energía se refieren a las reservas existentes a fines del año 2010. Estas cifras cuantifican los recursos así como también las reservas, que se muestran detalladamente a continuación según sus tres categorías (comprobadas, probables y posibles).

Reservas de gas 2009-2010

Miles de MM m3

Reservas	2009	2010	Incremento	%
Comprobadas	378,8	358,7	-20,1	-5,3
Probables	156,4	132,8	-23,6	-15,1
Posibles	208,5	180,2	-28,3	-13,6
TOTAL:	743,7	671,7	-72	-9,7

Las reservas cayeron un 53% en los nueve años del período 2001-2010. Por cada m3 extraído de gas se repuso menos de la cuarta parte, el 75% restante mermo directamente el stock previo acumulado de reservas. Este muy bajo nivel de reposición de reservas explica la drástica reducción de las mismas; todo esto se explica por la sustancial reducción en el esfuerzo exploratorio en los últimos años, tal como se indica a continuación:

EXPLORACION DE GAS Y PETROLEO

(1980-2010)

Período	Pozos de exploración (Promedio anual)	Precio del petróleo (WTI -USD por barril)
'80	103	18
'90	95	20
2001-2010	41	51
Año 2010	26	80

Es notable observar que en décadas pasadas, el nivel exploratorio era muy superior al actual (alrededor de 300 por ciento por encima), a pesar que el precio del petróleo era la cuarta parte del actual.

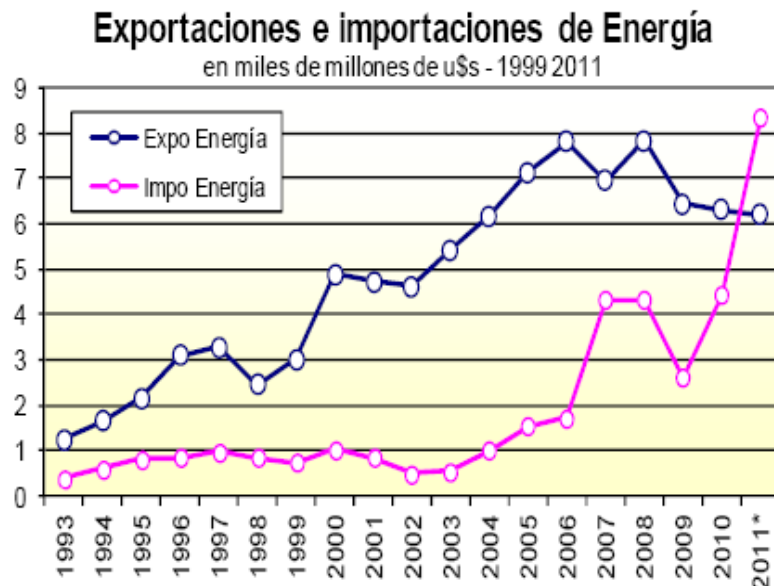
Un hecho que merece ser destacado es el fenómeno reciente de mejora importante en los "éxitos" del proceso exploratorio, tal como se muestra en el siguiente cuadro extraído del Instituto Argentino de Energía.

Años	% de éxito
1983/1989	28

1994/1999	45
2006/2009	80

Este aumento notable en el porcentaje de éxito en la exploración no responde a mejores condiciones geológicas sobre las áreas exploradas, sino que en la última década gran parte de lo que se califica como exploración, consiste en la prospección de áreas ya conocidas. Esto responde a una estrategia mucho más conservadora y predatoria de las empresas, que minimiza costos exploratorios por la falta de incentivos a asumir riesgos, orientándose a una inmediata valorización de las concesiones, priorizando la sobreexplotación de los pozos ya productivos (en las áreas cuyo potencial había sido verificado por las inversiones de riesgo hechas por la YPF estatal durante décadas) y a la exportación de lo extraído, en desmedro de la reposición de reservas y el mercado interno.

Esta caída en la exploración, acompañada de la caída en las reservas y por ende en la producción ya está afectando negativamente nuestra balanza comercial. Recordemos que hacia el 2006 la mitad del superávit comercial externo era aportado por el sector energético, cosa que no ocurre ahora (en el 2011 el déficit comercial energético superó los 3000 millones de dólares). Este déficit se multiplicará durante el corriente año.



Fuente: Econométrica S.A en base al INDEC *Estimación Econométrica S.A



Hasta aquí, dos certezas: con suerte, no superaremos la hidrocarburodependencia sino en el mediano plazo, en consonancia con los pronósticos referidos a la situación mundial –que se detallan más adelante-; y en el largo plazo, habida cuenta de la baja participación de las energías renovables en el plan oficial, nada parece indicar que el tránsito sea hacia una matriz social y ambientalmente más sustentable.

Con estas perspectivas, vemos que nuestra generación tiene grandes desafíos por delante, y deberá adoptarse un firme compromiso si se quiere corregir el rumbo. Si bien es cierto que ya desde hace varios años se viene trabajando en el país en distintos proyectos de investigación en la materia, y se ha invertido gran cantidad de recursos en desarrollar nuevas tecnologías, bajo la premisa de ser un país desarrollador de tecnologías y no uno importador, no existe ninguna certeza de que los nuevos desarrollos llegaran a tiempo para evitar una situación energética y medioambiental crítica.

Dado que se usan millones de barriles diarios de petróleo y que éste posee una elevada densidad energética, hay que pensar en la diversidad de materias primas y de tecnologías para reemplazarlo. Existen múltiples alternativas, sólo hay que tener la capacidad intelectual para elegir la más adecuada para cada escenario, teniendo en cuenta el impacto ambiental, la generación de mano de obra y la disponibilidad de materias primas locales.

Una economía de hidrógeno puede ser viable en dos o tres décadas, según cómo evolucionen los precios de los combustibles fósiles y los progresos tecnológicos que se logren en los procesos de obtención de hidrógeno y en el diseño de celdas de combustible y en la utilización en motores de combustión especialmente adaptados para este fin. El factor ambiental puede ser, por otra parte, decisivo en la transición de una economía basada en el petróleo a una basada en el hidrógeno. Cuando ese momento llegue, la Argentina deberá estar preparada para insertarse entre los países que dominen dicha tecnología.

Es destacable el avance y la cantidad de recursos que se han dedicado en la Argentina al estudio de las tecnologías relacionadas al hidrógeno, y de hecho es considerado un tema prioritario por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. Existen numerosos grupos de I + D de primer nivel, netamente direccionados a la producción, almacenamiento y uso del hidrógeno en celdas de combustible, y se están obteniendo algunos logros importantes. Sin embargo, desde nuestro punto de vista, pasarán muchos años hasta que todos estos desarrollos en fase de investigación sean de aplicación masiva y emerja una industria relacionada a estas tecnologías del hidrógeno. Hasta tanto llegue



ese momento, quizás resulte interesante y altamente productivo, estudiar de qué manera se pueden utilizar de plataforma los procesos tecnológicos actuales, para que con pequeñas adaptaciones, se pueda migrar a la tecnología del hidrógeno y de las fuentes sustentables de energía.

Los integrantes del presente proyecto, aparte de preocuparles los aspectos políticos y socioambientales antes descritos, son entusiastas de los motores. También estaban interesados en hacer un aporte interesante hacia la Universidad como medio de agradecimiento y devolución por los conocimientos recibidos y la confianza brindada durante el transcurso de la carrera.

Les pareció un desafío interesante no sólo realizar los cálculos teóricos sino llevar a la práctica la implementación de las modificaciones en un motor existente, que utiliza nafta como combustible, para que funcione con hidrógeno. Además construyeron un banco de ensayos adaptado a las necesidades del mismo con el fin de evaluar y comparar en profundidad las prestaciones que éste brinda con el uso de los combustibles antes nombrados.

De esta manera se realiza un aporte importante a una posible línea de investigación en el departamento de Mecánica, apostando a que la investigación en fuentes renovables y no contaminantes de energía sea una línea de trabajo de la Facultad de Ingeniería.



2. Propiedades del Hidrógeno

2.1 *Estructura atómica*

El hidrógeno es en gran medida el elemento más abundante del universo, componiendo el 75% de la masa de toda la materia visible en estrellas y galaxias.

El hidrógeno es el más simple de todos los elementos. Se puede visualizar un átomo de hidrógeno como núcleo central denso con un solo electrón orbitando a su alrededor, algo parecido a un planeta orbitando alrededor del Sol.

En la mayoría de átomos de hidrógeno, el núcleo está formado por un único protón, aunque existe una variante extraña (o "isótopo") del hidrógeno que contiene un protón y un neutrón. Ésta forma de hidrógeno se denomina deuterio o hidrógeno pesado.

Existen otros isótopos de hidrógeno, como el tritio, con dos neutrones y un protón, pero son más inestables.

La mayor parte de la masa de un átomo de hidrógeno se concentra en su núcleo.

La masa atómica del hidrógeno es de 1,007940 kg/kmol; mientras que su masa molecular es de 2,01588 kg/kmol.

2.2 *Propiedades físicas*

2.2.1 *Estado*

El hidrógeno es el segundo elemento de la tabla periódica que dispone de los puntos de ebullición y de fusión más bajos, después del helio. Se encontrará en estado líquido por debajo de su punto de ebullición, a $-252,77\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se encontrará en estado sólido por debajo de su punto de fusión, a $-259,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presión atmosférica. Como puede observarse, estas temperaturas son extremadamente bajas (Se habla de temperaturas



criogénicas cuando éstas se encuentren por debajo de -73°C , con lo que todos aquellos líquidos que se encuentren a esas temperaturas serán denominados líquidos criogénicos).

El punto de ebullición de un combustible es un parámetro crítico, ya que define la temperatura a la cual debe ser enfriado para almacenarlo y poderlo utilizar en su estado líquido. Los combustibles que se encuentren en estado líquido ocuparán menos espacio de almacenaje que los combustibles gaseosos, además de ser más fáciles de transportar. Por esta razón, los combustibles que se encuentren en estado líquido en condiciones atmosféricas (como pueden ser la nafta, el diesel, metanol, o el etanol) son particularmente interesantes. Por otro lado, todos aquellos combustibles que en condiciones atmosféricas se encuentren en estado gaseoso (como puedan ser el hidrógeno o el gas natural) son menos convenientes ya que deberán ser almacenados como gas presurizado o bien como líquido criogénico.

El punto de ebullición de una sustancia pura aumenta a medida que se eleva la presión. Desafortunadamente, el punto de ebullición del hidrógeno puede aumentarse únicamente hasta un máximo de -240°C aplicando aproximadamente 13 barg.

En cuanto a la capacidad calorífica específica del hidrógeno, éste tiene un calor específico a presión constante (C_p) de $28,623 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$; y un calor específico a volumen constante (C_v) de $20,309 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$.

2.2.2 Olor, color y gusto

El hidrógeno puro es inodoro, no tiene color y es insípido. Si se produjese un escape de hidrógeno, éste resultaría casi invisible en la luz del día. El hidrógeno obtenido a partir de otros combustibles fósiles viene acompañado generalmente por nitrógeno, bióxido de carbono, monóxido de carbono y otros gases. Todos ellos son también en la mayoría de casos inodoros, incoloros e insípidos.

2.2.3 Toxicidad

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



Es por eso que se debe tener precaución en caso de manipular hidrógeno en recintos pequeños y cerrados, ya que una fuga podría llegar a causar la muerte por asfixia. El hidrógeno inhalado puede dar lugar a una mezcla inflamable dentro del cuerpo. Debe tenerse en cuenta, además, que el resto de gases que puedan encontrarse mezclados con el hidrógeno, al haber sido éste extraído de otros combustibles fósiles, como por ejemplo nitrógeno, monóxido de carbono, bióxido de carbono y otros, pueden también actuar como asfixiadores desplazando el oxígeno.

2.2.4 Densidad y medidas relacionadas

El hidrógeno dispone de un peso atómico más bajo que cualquier otra sustancia, y por lo tanto tendrá una densidad muy baja tanto en estado líquido como gaseoso.

- **Densidad**

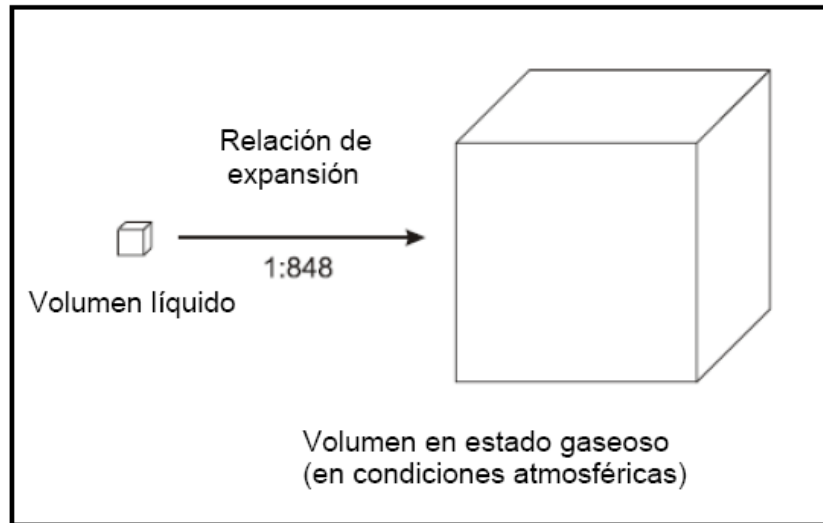
El hidrógeno dispone de una densidad en estado gaseoso (a 20°C y 1 atm) de 0,08376 kg/m³; y una densidad líquida de 0,0708 kg/l.

- **Volumen específico**

El volumen específico de gas de hidrógeno (con unas condiciones de 20°C y 1 atm) es de 11,9 m³/kg, mientras que el volumen específico del hidrógeno líquido (a – 253°C y 1 atm) es de 0,014m³/kg.

- **Relación de expansión**

Cuando el hidrógeno se almacena como un líquido, se evapora durante su expansión a condiciones atmosféricas, con un aumento correspondiente en su volumen. La relación de expansión del hidrógeno es de 1:848, y significa que el hidrógeno, en su estado gaseoso en condiciones atmosféricas, ocupa 848 veces más que cuando se encuentra en estado líquido.



Relación de expansión del hidrógeno de líquido a gas

Cuando el hidrógeno se almacena como un gas a alta presión (250 barg) a temperatura atmosférica, su relación de expansión a presión atmosférica es de 1:240.

- **Fugas**

Las moléculas del gas de hidrógeno son mucho más pequeñas que las del resto de gases, con lo que pueden difundirse a través de muchos materiales considerados herméticos o impermeables a otros gases. Esta característica hace del hidrógeno un elemento más difícil de contener que otros gases.

Las fugas de hidrógeno son peligrosas, ya que con ellas existe el riesgo de que se produzca fuego al mezclarse con el aire. No obstante, el pequeño tamaño de la molécula que aumenta la probabilidad de que se produzca una fuga, también da lugar a que el hidrógeno que haya escapado del lugar donde estaba almacenado se diluya rápidamente, especialmente si nos encontramos al aire libre.

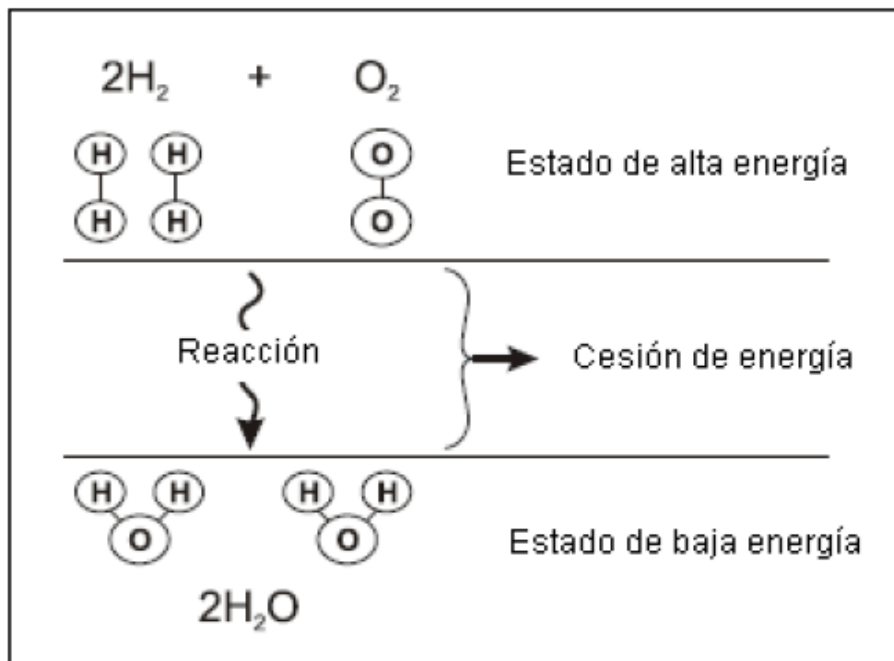
Cuando el hidrógeno se utiliza como combustible, el hecho de que pueda producirse una fuga hace necesario prestar una especial atención en el diseño del sistema, para asegurarse de que cualquier fuga pueda dispersarse y diluirse de la forma más fácil posible.

2.3 *Propiedades químicas*

2.3.1 *Reactividad*

La alta reactividad es una característica de todos los combustibles químicos. En cada caso, se produce una reacción química cuando las moléculas de combustible forman enlaces con el oxígeno que hay en el aire, de modo que al final, las moléculas que han reaccionado dispondrán de menor energía que cuando se encontraban en su estado inicial, sin reaccionar.

Cuando las moléculas reaccionan, el cambio producido en el estado de su energía va acompañado de una cesión de energía que podremos utilizar para producir trabajo útil. Esta cesión de energía es análoga a lo que ocurre cuando el agua fluye de un alto nivel hasta un nivel inferior. Cuando se encuentra en el alto nivel dispone de una cierta energía potencial, que disminuye a medida que disminuye también el nivel del agua. Esta pérdida de energía potencial podrá ser aprovechada para realizar trabajo útil. Las reacciones químicas de este tipo, para que se produzcan, requieren a menudo una cierta cantidad de energía de activación.



Estados de la energía química



Cuando se proporciona una cantidad pequeña de energía de activación a una mezcla de hidrógeno y oxígeno, por ejemplo en forma de chispa, las moléculas reaccionan de forma vigorosa, lanzando una cantidad considerable de calor, y obteniendo agua como producto final.

La formación de agua mediante la reacción de hidrógeno y oxígeno es reversible, es decir, que si disponemos de agua en un estado de baja energía, si aplicamos una cierta cantidad de energía podremos obtener hidrógeno y oxígeno. Éste es el principio en el que se basa la producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua.

En términos de reducción de la contaminación, el hidrógeno se convierte en un combustible casi ideal, ya que no contiene elementos carbonosos ni sulfurosos, con lo que no se producirá CO, CO₂, SO_x ni hollín durante su combustión.

2.3.2 Energía

Todo combustible es capaz de liberar una cierta cantidad de energía cuando reacciona con el oxígeno. Esta cantidad de energía se mide experimentalmente y se cuantifica como el poder calorífico superior de un combustible (PCS o HHV; que son las siglas anglosajonas de Higher Heating Value), y como el poder calorífico inferior (PCI o LHV; Low Heating Value). La diferencia entre el PCS y el PCI es el “calor de la evaporación” y representa la cantidad de energía requerida para vaporizar el agua que se produce durante la combustión.

En el caso del hidrógeno, éste dispone de un HHV de 141,86 kJ/g (a una temperatura de 25°C y una presión de 1 atm.); y de un LHV de 119,93 kJ/g (en las mismas condiciones anteriores). El hidrógeno dispone de la relación peso – energía más alta que cualquier combustible, al ser el elemento menos denso ya que no dispone de ningún átomo de carbón pesado. Es por esta razón que el hidrógeno se ha utilizado extensivamente en los diferentes programas espaciales, donde el peso resulta un elemento crucial.

La cantidad de energía liberada durante la reacción del hidrógeno, es cerca de 2,5 veces el calor producido en la combustión de los hidrocarburos más comunes (nafta, diesel, metano, propano, etc.)

Mientras que el contenido en energía nos informa la cantidad de energía que hay en un determinado peso de combustible, la densidad de energía nos informa la cantidad de energía que hay en un cierto volumen de combustible. Así, la densidad de energía



es el producto del contenido en energía (LHV) y de la densidad de un combustible determinado.

La densidad de la energía es en realidad una medida que nos informa sobre lo compactados que se encuentran los átomos de hidrógeno en un combustible. La densidad de la energía del hidrógeno es bastante pobre (ya que este elemento dispone de una densidad muy baja), aunque su relación peso energía es la mejor de todos los combustibles, precisamente al ser tan liviano.

A continuación se ofrece una tabla donde se compara la densidad de la energía de varios combustibles.

Combustible	Densidad de la energía (LHV)
Hidrógeno	10050 kJ/m ³ ; gas a 1 atm. y 15°C 1825000 kJ/m ³ ; gas a 200 bar _g y 15°C 4500000 kJ/m ³ ; gas a 690 bar _g y 15°C 8491000 kJ/m ³ ; líquido
Metano	32560 kJ/m ³ ; gas a 1 atm. y 15°C 6860300 kJ/m ³ ; gas a 200 bar _g y 15°C 20920400 kJ/m ³ ; líquido
Propano	86670 kJ/m ³ ; gas a 1 atm. y 15°C 23488800 kJ/m ³ ; líquido
Gasolina	31150000 kJ/m ³ ; líquido
Diesel	31435800 kJ/m ³ ; líquido
Metanol	15800100 kJ/m ³ ; líquido

La densidad de la energía de un combustible variará si éste se almacena como un líquido o como un gas y, en el caso de almacenarse en estado gaseoso, influirá también a qué presión se ha efectuado.

2.3.3 Inflamabilidad



Son necesarias tres cosas para que se produzca fuego o una explosión: combustible (hidrógeno, por ejemplo), comburente (oxígeno, mezclado con el combustible en cantidades apropiadas) y una fuente de ignición (generalmente una chispa).

- **Punto de inflamación (o “flashpoint”)**

Todos los combustibles queman únicamente cuando se encuentran en estado gaseoso o de vapor. Combustibles como el hidrógeno o el metano se encuentran ya en estado gaseoso en condiciones atmosféricas, mientras que otros combustibles, como la nafta o el gas oil, se encuentran en estado líquido, por lo que resulta necesario evaporarlos antes de quemarlos. La característica que describe la facilidad de evaporar los combustibles es su punto de inflamación o flashpoint. Éste se define como la temperatura mínima a la cual el combustible desprende vapores inflamables suficientes a la presión atmosférica, es decir, que arden al entrar en contacto con una fuente de ignición, pero sin propagarse la combustión a la masa líquida del combustible.

Si la temperatura del combustible se encuentra por debajo de su punto de inflamación, no será capaz de producir la cantidad suficiente de vapores para quemarse, puesto que su proceso de evaporación será demasiado lento. Siempre que un combustible se encuentre en ó por encima de su punto de inflamación, los vapores que desprende estarán presentes. No debe confundirse el punto de inflamación con la temperatura a la cual el combustible estalla en llamas, esto es la temperatura de auto ignición.

El punto de inflamación es siempre más bajo que el punto de ebullición del combustible. Para los combustibles que se encuentren en estado gaseoso en condiciones atmosféricas (como el hidrógeno, el metano y el propano), el punto de inflamación se encuentra muy por debajo de la temperatura ambiente y tiene poca importancia, puesto que el combustible ya se encuentra totalmente vaporizado. El punto de inflamación es el momento más propicio para el peligro de incendio de los combustibles líquidos y su conocimiento es de suma importancia.

A continuación se ofrece una tabla en la que se muestra el punto de inflamación de algunos combustibles.

Combustible	Punto de inflamación
Hidrógeno	$< -253^{\circ}\text{C}$
Metano	-188°C
Propano	-104°C
Gasolina	Aproximadamente a -43°C
Metanol	11°C



- **Rango de inflamabilidad**

El rango de inflamabilidad de un gas se define como aquel rango comprendido entre los límites superior (UFL; Upper Flammability Limit) e inferior (LFL; Lower Flammability Limit) de inflamabilidad del mismo.

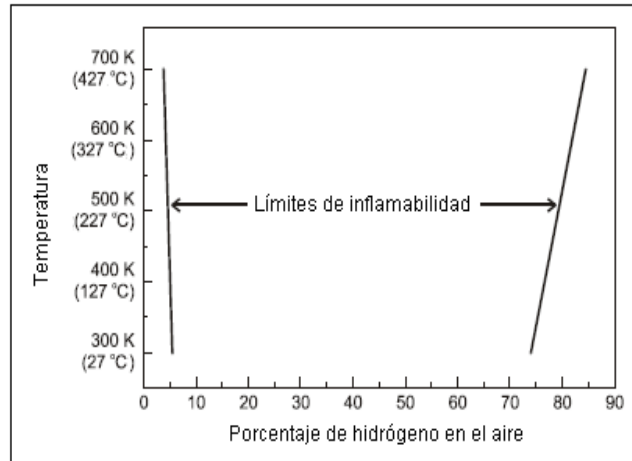
El límite inferior de inflamabilidad de un gas es la mínima concentración de ese gas que puede admitir una llama que se propaga al ser mezclada con el aire y encendida, para seguir quemando. Por debajo del límite inferior de inflamabilidad no hay suficiente combustible como para permitir la combustión, la mezcla de aire/combustible es muy pobre.

El límite superior de inflamabilidad de un gas es la máxima concentración de ese gas que puede admitir una llama que se propaga después de haberse mezclado con el aire y haber sido encendida, para poder seguir quemando. Por encima de este límite, hay una deficiencia de oxígeno que no permite continuar la combustión, es decir, que ocurre lo contrario al caso anterior: la mezcla de aire/combustible es demasiado rica.

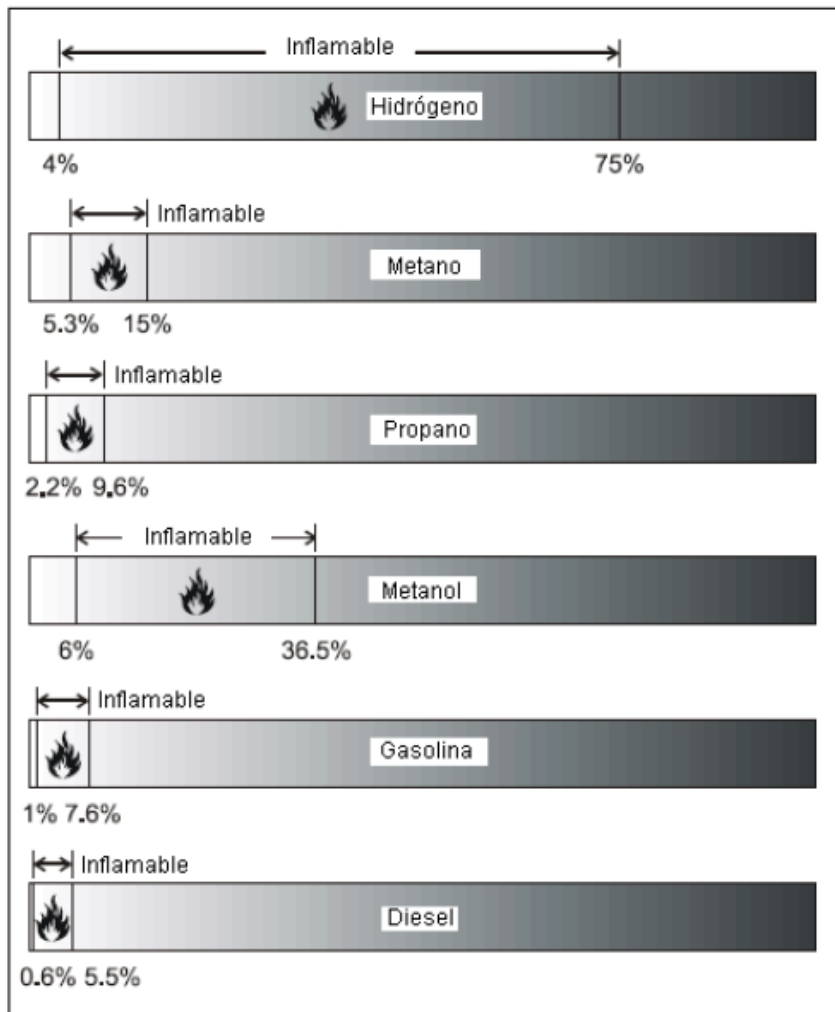
Entre estos dos límites encontraremos la gama inflamable en la cual el gas y el aire disponen de unas proporciones correctas para permitir la combustión una vez se haya encendido. Una mezcla estequiométrica ocurre cuando las moléculas del oxígeno y del hidrógeno están presentes en la cantidad necesaria exacta para completar la reacción de la combustión. Si hay más hidrógeno que oxígeno, la mezcla será rica, de modo que una parte del combustible no reaccionará mientras que todo el oxígeno será consumido. Si lo que tenemos es menor cantidad de hidrógeno que de oxígeno, la mezcla será pobre, de manera que se consumirá todo el combustible pero no todo el oxígeno. Una consecuencia del límite superior de inflamabilidad es que el hidrógeno almacenado (ya sea gaseoso o líquido) no será inflamable debido a la ausencia de oxígeno en los depósitos. El combustible únicamente será inflamable en la periferia de alguna fuga, donde la mezcla del combustible con el aire alcance las proporciones adecuadas.

Dos conceptos relacionados son el límite inferior explosivo (LEL; Lower Explosive Level) y el límite superior explosivo (UEL; Upper Explosive Level). Estos dos términos se usan frecuentemente junto con los límites superior e inferior de inflamabilidad, aunque no son exactamente lo mismo. Como ya se ha dicho anteriormente, el límite inferior de inflamabilidad de un gas es la mínima concentración de ese gas que puede admitir una llama que se propaga al ser mezclada con el aire y encendida, para seguir quemando. Parecido, el UEL es la máxima concentración de gas que ayudará a una explosión cuando entre en contacto con el aire y se encienda. El hidrógeno es inflamable en una gama muy amplia de concentraciones en el aire (4% - 75%) y resulta explosivo sobre

una también amplia gama de concentraciones (15% - 59%) en una temperatura atmosférica estándar. Tal y como se muestra en la siguiente figura, los límites de inflamabilidad aumentan con la temperatura. Como consecuencia, incluso las pequeñas fugas de hidrógeno corren el peligro de incendiarse o estallar. Si además nos encontramos en un recinto cerrado, la fuga de hidrógeno puede concentrarse, de tal modo que se aumenta el riesgo de combustión y explosión.



Variación de los límites de inflamabilidad del hidrógeno, en relación a la temperatura



Rangos de inflamabilidad de diferentes combustibles a temperatura ambiente

- **Temperatura de autoencendido**

La temperatura de autoencendido es la mínima temperatura necesaria para iniciar la combustión de una mezcla de combustible en ausencia de fuente de ignición. Dicho de otra manera, el combustible se calienta hasta que se inflama. Para el hidrógeno, la temperatura de autoencendido es relativamente alta (unos 585°C). Esto hace que sea difícil prender una mezcla de aire/hidrógeno únicamente con calor, sin una fuente adicional de ignición (una chispa por ejemplo).

A continuación se ofrece una tabla en la que se muestra el valor de la temperatura de autoencendido de diversos combustibles.



Combustible	Temperatura de autoencendido
Hidrógeno	585°C
Metano	540°C
Propano	490°C
Metanol	385°C
Gasolina	Entre 230°C y 480°C

- **Número de octano**

El número de octano describe la resistencia a la detonación de un combustible. La detonación es un proceso de combustión anormal y potencialmente perjudicial para la integridad del motor.

El proceso de combustión normal se desarrolla luego de la ignición mediante arco eléctrico en la bujía generando un frente de llama que progresa gradualmente hasta quemar la totalidad de la mezcla en la cámara de combustión.

Mientras este frente avanza, se comprime la porción de mezcla aún no quemada, esta compresión rápida hace que la mezcla no quemada aumente su temperatura pudiendo llegar a las condiciones de autoinflamación quemándose de manera casi instantánea. Este proceso es el que se denomina detonación y puede producir daños en el motor por efectos mecánicos debidos a la generación de un campo de presiones no uniforme actuando sobre el pistón. Simultáneamente, esta combustión brusca localizada, genera ondas de presión que disminuyen el efecto aislante de la capa límite haciendo que los gases calientes transfieran calor más enérgicamente hacia los contornos de la cámara pudiendo generar puntos de fusión en el pistón y problemas de fatiga térmica en la tapa y válvulas.

La posibilidad de ocurrencia de detonación depende de muchos factores además de la calidad del combustible. En particular, la relación de compresión es uno de los factores más determinantes, por lo que las elevadas relaciones de compresión buscadas para mejorar el rendimiento termodinámico del ciclo, deben ir acompañadas de la utilización de elevado número octánico.

Por otra parte, la relación de mezcla también influye, si bien la mezcla estequiométrica es la más reactiva y potencialmente debería ser la más detonante, al trabajar con mezclas pobres, la combustión es más lenta y durante el proceso de escape los gases tienen mayor temperatura haciendo que algunas partes de la cámara de combustión alcancen temperaturas más elevadas haciendo que las condiciones sean más favorables para la aparición de detonación.

El funcionamiento con mezclas pobres es de especial interés en los motores que funcionan con hidrógeno, esta característica se estudia con más profundidad en este trabajo en capítulos posteriores.



El hidrógeno posee un elevado número de octano, con lo que es especialmente resistente a detonaciones, aún cuando se realizan combustiones con mezclas muy pobres.

A continuación se muestra una tabla con el número de octano de diferentes combustibles.

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

- **Energía de ignición**

La energía de ignición es la cantidad de energía externa que se debe aplicar para encender una mezcla de combustible. La temperatura de una fuente externa debe ser mayor que la temperatura de autoencendido pero no es condición suficiente, además, debe entregarse a la mezcla combustible una cantidad mínima de energía para lograr que se genere una masa crítica de productos de combustión capaces de propagar la combustión al resto de la mezcla.

Aunque el hidrógeno tenga una temperatura más elevada de autoencendido que el metano, el propano o la nafta, su energía de ignición de 0,02 mJ es mucho más baja y resulta por lo tanto más propenso a inflamarse. Incluso una chispa invisible o una descarga de electricidad estática procedente del cuerpo humano (en condiciones secas) pueden tener la suficiente energía como para provocar su ignición.

Además, el hidrógeno tiene la característica agregada de la baja electroconductividad, de modo que el flujo o la agitación del gas o líquido de hidrógeno puede generar cargas electrostáticas que pueden dar lugar a chispas. Por esta razón, el equipo que transporta el hidrógeno debe disponer de una toma de tierra.

- **Velocidad de quemado**

La velocidad de quemado es la velocidad a la cual la llama viaja a través de la mezcla del gas combustible. La velocidad de quemado es diferente de la velocidad de llama. La velocidad de quemado indica la severidad de una explosión puesto que las altas velocidades de quemado tienen una mejor tendencia a apoyar la transición desde la



deflagración hasta la detonación en largos túneles o tubos. La velocidad de llama es la suma de la velocidad de quemado y la velocidad de desplazamiento de la mezcla del gas que no haya sido quemada.

La velocidad de quemado varía con la concentración de gas a ambos extremos del rango de inflamabilidad. Tanto por debajo del límite inferior de inflamabilidad como por encima del límite superior de inflamabilidad, la velocidad de quemado es cero. La velocidad de quemado del hidrógeno varía entre 2,65 m/s y 3,25 m/s. De este modo, una fuga de hidrógeno quemará rápidamente y, consecuentemente, su combustión tenderá a ser de breve duración.

- **Distancia de apagado**

La distancia de apagado describe las propiedades de extinción de la llama de un combustible cuando éste se usa en un motor de combustión interna. Concretamente, la distancia de apagado se refiere a la distancia a la que se apaga la llama tomando como referencia la pared del cilindro, debido a las pérdidas de calor.

La distancia de apagado del hidrógeno es de 0,064 cm., aproximadamente 3 veces menos que la distancia de apagado de otros combustibles como la nafta. De este modo, las llamas que produce el hidrógeno al quemarse circulan más cerca de la pared del cilindro antes de extinguirse, con lo que resultan más difíciles de apagar que las llamas que produce la nafta. Esta menor distancia de apagado puede aumentar también la tendencia al petardeo, ya que la llama de una mezcla de aire/hidrógeno puede pasar más fácilmente cerca de una válvula entreabierta que en el caso de la combustión de una mezcla de aire/hidrocarburo.

- **Características de la llama**

Las llamas de hidrógeno presentan un color azul muy claro y resultan casi invisibles a la luz del día debido a la ausencia de hollín. La visibilidad es realizada por la presencia de humedad o impurezas (tales como sulfuro) en el aire. En cambio, las llamas de hidrógeno son fácilmente visibles en la oscuridad o bien con luz artificial.

Una combustión de hidrógeno puede ser indirectamente visible al observar la emanación de una especie de “ondulaciones” y la radiación termal, especialmente en los grandes fuegos.

En muchos aspectos, los incendios de hidrógeno resultan ser más seguros que los de nafta. El hidrógeno se eleva más rápidamente debido a sus altos valores de difusividad y flotabilidad. De esta manera, los incendios de hidrógeno son verticales y altamente localizados. Cuando el cilindro que contiene el hidrógeno en un automóvil alimentado con este combustible se rompe y se produce la ignición, el fuego arderá lejos del coche y su interior no alcanzará elevadas temperaturas. En la página siguiente se ofrece una secuencia de imágenes donde se observa la diferencia de comportamiento del fuego en caso de producirse un incendio en un coche alimentado por hidrógeno (coche de la izquierda) y en otro alimentado por nafta (coche de la derecha).



Tiempo = 0 s



Tiempo = 3 s



Tiempo = 1 min



El hidrógeno quemará de forma más intensa que la nafta, pero durante un período de tiempo más corto. Además, mientras que de la combustión de la nafta se generarán humos tóxicos, al quemarse el hidrógeno, éste no emitirá ningún tipo de elemento nocivo al ambiente.

2.3.4 Fragilización por hidrógeno

La exposición constante al hidrógeno causa un fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno en muchos materiales. La fragilización por hidrógeno ha sido definida como la pérdida de resistencia y ductilidad inducida por el hidrógeno que puede derivar en la iniciación o propagación de fracturas mecánicas. La fragilización por hidrógeno es especialmente devastadora debido a la naturaleza del fallo originado. Dicho fallo sucede a tensiones muy pequeñas (en comparación a las que serían necesarias en ausencia del hidrógeno), es bastante frágil y tiene un periodo de "incubación" tan variable que lo hace prácticamente impredecible.

Los mecanismos que causan los efectos de la fragilización por hidrógeno no están del todo bien definidos. Los factores conocidos que influyen el índice y la severidad del fenómeno incluyen: la concentración de hidrógeno, su presión, temperatura, pureza, tipos de impurezas, composición del metal, nivel de fatiga, medida de grano, historia sobre su microestructura y tratamiento térmico. La existencia de humedad en el gas de hidrógeno puede conducir a la fragilización del metal debido a la formación de grietas como consecuencia de la fatiga.

El problema de la fragilización por hidrógeno afecta a los tres sistemas básicos de cualquier industria que emplee el hidrógeno:

- Producción.
- Transporte/Almacenamiento.
- Utilización.

La elección de los materiales para el confinamiento del hidrógeno para una aplicación específica dependerá de la confiabilidad y costo que requiera el sistema.

Las aleaciones que son capaces de resistir a la fragilización por hidrógeno son:

- Acero inoxidable (austenita)
- Aleaciones de cobre



- Aleaciones de aluminio

Por otro lado, las aleaciones que no se recomiendan utilizar con hidrógeno, por resultar poco resistentes a la fragilización son:

- Aleaciones de hierro (ferrita, martensita y bainita)
- Titanio y aleaciones de titanio
- Algunas aleaciones de níquel

3. Hidrógeno en MCIA

3.1 *Breve historia sobre los motores de hidrógeno*

El interés por el hidrógeno como combustible no es tan reciente como se pueda creer. La tentativa más temprana en desarrollar un motor alimentado por hidrógeno fue divulgada por el reverendo W. Cecil en 1820. Cecil presentó su trabajo ante la Cambridge Philosophical Society en un papel titulado "En la aplicación del gas de hidrógeno para producir energía móvil en una máquina". El motor funcionó basándose en el principio de vacío, en donde la presión atmosférica mueve el pistón contra el vacío para producir potencia. El vacío se creaba quemando una mezcla de hidrógeno y aire, permitiendo que se expandiese y que posteriormente reenfrase. Aunque el motor funcionó satisfactoriamente, los motores de vacío nunca llegaron a ser prácticos.

Sesenta años más tarde, durante su trabajo con los motores de combustión, durante las décadas de 1860 y 1870, Nikolaus August Otto (el inventor del ciclo Otto), utilizó, según se informa, un productor sintético de gas para el combustible, que probablemente contenía hidrógeno en un 50%. Otto experimentó también con nafta, pero considerando que era peligroso trabajar con ese combustible, decidió volver a usar los combustibles gaseosos. El desarrollo del carburador, no obstante, inició una nueva era en la cual la nafta pudo usarse de manera práctica y segura, con lo que desplomó el interés por los demás combustibles.

Varios años más tarde, cuando se comenzaron a construir los dirigibles, que eran básicamente globos de hidrógeno, el ingeniero alemán Rudolph Erren trabajó en un motor para estos aparatos cuyo combustible era el hidrógeno. Llegó a resolver los problemas de autoencendido en el carburador mediante la inyección directa y, de no



ser por ciertos acontecimientos (el más famoso es el accidente del Hindenburg) y por el descubrimiento de grandes y accesibles yacimientos de petróleo, podría haber sido posible la construcción de motores a hidrógeno.

Desde entonces, el hidrógeno se ha utilizado extensivamente en el programa espacial, puesto que dispone de la mejor relación energía/peso de cualquier combustible. Esto, junto a la carrera espacial entre la antigua U.R.R.S. y los Estados Unidos, produjo un gran avance en el manejo del hidrógeno. El hidrógeno en estado líquido es el combustible más elegido para los motores espaciales, además de propulsar a varios vehículos en diversas misiones espaciales, incluyendo algunas etapas de los propulsores de las misiones lunares Apollo, Skylab, las misiones Viking en Marte y la misión Voyager a Saturno.

3.2 *Propiedades combustibles del hidrógeno*

Algunas de las propiedades del hidrógeno lo convierten en una muy interesante opción para su uso como combustible aunque otras, pueden generar ciertos inconvenientes. A continuación se realiza un análisis sobre las siguientes propiedades características del hidrógeno:

- Amplia gama de inflamabilidad.
- Baja energía de ignición.
- Pequeña distancia de apagado.
- Temperatura de autoignición elevada.
- Alta velocidad de llama en condiciones estequiométricas.
- Elevada difusividad.
- Muy baja densidad.

3.2.1. Amplia gama de inflamabilidad

El hidrógeno dispone de una amplia gama de inflamabilidad en comparación con el resto de combustibles. Como consecuencia, el hidrógeno puede ser quemado en un motor de combustión interna sobre una amplia gama de mezclas aire/combustible. Una ventaja significativa de esto es que el hidrógeno puede funcionar aún en una mezcla muy pobre, es decir, donde la cantidad de combustible es mucho menor que la cantidad teórica, estequiométrica o químicamente ideal necesaria para la combustión con una cantidad dada de aire.



Generalmente, la economía del combustible es mayor y la reacción de combustión es más completa cuando un motor funciona con una mezcla pobre de aire/combustible. Además, la temperatura final de la combustión es generalmente más baja, reduciendo así la cantidad de agentes contaminantes, tales como óxidos de nitrógeno, emitidos a través del escape.

3.2.2. Baja energía de ignición

El hidrógeno tiene una energía de ignición muy baja. La cantidad de energía necesaria para encender el hidrógeno es mucho menor que en el caso de la nafta. Esta característica permite a los motores de combustión interna de hidrógeno quemar mezclas pobres y asegurar una rápida ignición.

Desafortunadamente, la baja energía de ignición significa que los gases calientes y las zonas calientes del cilindro, pistón y válvulas pueden actuar como fuentes de ignición, creando problemas de ignición prematura y retroceso de llama. Prevenir este hecho es uno de los desafíos asociados cuando se diseña un motor de combustión interna de hidrógeno y debido a ello se deben considerar una serie de cambios necesarios para quemar hidrógeno en un motor de combustión interna.

El primer cambio es referente a las bujías. Deberán ser de tipo frías y no deberán disponer de punta de platino, debido a que el platino es un catalizador, promoviendo la ignición. Los conectores de tipo frío están diseñados para enfriarse rápidamente y, por lo tanto, evitar la posibilidad de actuar como bujía incandescente causando la preignición.

En los motores de hidrógeno, de encendido por chispa, se obtiene una ignición óptima con una distancia entre los electrodos de la bujía, que oscila entre $1/2$ y $1/3$ de la distancia empleada en los motores a nafta.

El segundo cambio se refiere al tipo de aceite lubricante utilizado. Deberá utilizarse aceite sintético con el fin de evitar la pirolisis causada por pequeñas zonas calientes de la cámara de combustión, que llegarían a provocar la preignición del combustible. La pirolisis es un proceso de descomposición térmica que puede llegar a destruir el aceite y descomponerlo. Con el fin de evitar que suceda esto, deberán instalarse sistemas de ventilación del cárter y separadores de aceite.



3.2.3. Pequeña distancia de apagado

El hidrógeno, cuando se quema, tiene una distancia de apagado muy pequeña, más pequeña que en el caso de la nafta. Por este motivo, las llamas de hidrógeno circularán más cerca de las paredes del cilindro que otros combustibles antes de extinguirse. Por lo tanto, resultará más difícil apagar una llama de hidrógeno que una llama de nafta. La menor distancia de apagado puede incrementar también la tendencia a que se produzca el fenómeno de retroceso de llama, puesto que la llama de la mezcla aire/hidrógeno puede introducirse más fácilmente a través de una válvula de admisión entreabierta que si se tratase de una mezcla aire/nafta.

3.2.4. Temperatura de autoignición elevada

El hidrógeno dispone de una temperatura de autoignición relativamente elevada. Esto tiene implicaciones importantes cuando se comprime una mezcla de aire e hidrógeno. De hecho, la temperatura de autoignición es un factor importante en la determinación de la relación de compresión que debe tener un motor, puesto que el aumento de temperatura durante la compresión está relacionado con la relación de compresión.

El aumento de temperatura viene determinado por la siguiente ecuación:

$$T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{\gamma - 1}$$

Donde:

V_1/V_2 = relación de compresión

T_1 = temperatura inicial absoluta

T_2 = temperatura final absoluta

γ = relación de calores específicos

La temperatura final absoluta limita la relación de compresión. La elevada temperatura de autoignición del hidrógeno permite usar mayores relaciones de compresión en este tipo de motores que en motores alimentados por combustibles fósiles.

En lo que a detonación se refiere, gran parte de los estudios de investigación se han realizado con motores de hidrógeno. Esto es debido a que la combustión de mezclas hidrógeno-aire es bien conocida. Numerosas investigaciones, han demostrado que el origen de la detonación es la misma tanto en motores a nafta como en motores a hidrógeno. La detonación es originada por auto-ignición de la mezcla final, después que esta mezcla final ha sido comprimida, como resultado de la combustión en la primera parte de la mezcla. En este proceso, interviene el concepto de tiempo de



retardo, este es el tiempo que una mezcla tarda en encenderse luego de haber superado la temperatura de inflamación, este tiempo decrece en la medida en que la temperatura sea mayor. Los combustibles con alto poder antidetonante poseen un elevado tiempo de retardo.

Dado que el hidrógeno posee un alto poder antidetonante, se deduce que los límites de relación de compresión, por detonación, del motor de hidrógeno son superiores a los del motor a nafta. En los motores de hidrógeno por tanto la relación de compresión está limitada principalmente por la aparición de preignición. Si la preignición puede ser evitada, es posible utilizar relaciones de compresión mucho más altas que en los motores a nafta, y que son comparables a las utilizadas en motores Diesel. Es sabido que los combustibles que presentan una baja tendencia a la detonación son generalmente poco apropiados para motores de ignición por compresión. En efecto, la ignición por compresión del hidrógeno es difícil de conseguir, debido a su alto tiempo de retardo. No obstante, varios estudios ponen de manifiesto que con la inyección de pequeñas cantidades de otro combustible, como el gas-oíl, es factible la utilización de hidrógeno en este tipo de motores.

3.2.5. Alta velocidad de llama

El hidrógeno tiene una alta velocidad de llama en condiciones estequiométricas. Bajo estas condiciones, la velocidad de llama del hidrógeno es bastante más elevada que en el caso de la nafta. Esto significa que los motores de combustión interna de hidrógeno podrán acercarse más al ciclo termodinámico ideal del motor. No obstante, con mezclas pobres de aire/hidrógeno, la velocidad de la llama disminuye significativamente.

3.2.6. Alta difusividad

El hidrógeno tiene una difusividad muy alta. Esta capacidad para dispersarse en el aire es considerablemente mayor que en el caso de la nafta, y resulta ventajoso por dos razones principales. En primer lugar, facilita la formación de una mezcla uniforme del combustible con el aire. En segundo lugar, en caso de producirse una fuga de hidrógeno, éste se dispersará rápidamente.

3.2.7. Baja densidad

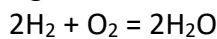
El hidrógeno tiene una densidad muy baja. Esto da lugar a dos problemas cuando se utiliza como combustible en un motor de combustión interna.



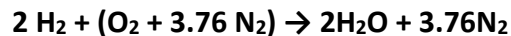
En primer lugar afectará al volumen que ocupará el combustible en el interior del cilindro de almacenaje previo a la combustión, siendo necesario un gran volumen de dicho cilindro como para que el vehículo pueda ofrecer unas buenas características de conducción. En segundo lugar, el aumento de volumen del combustible reducirá la cantidad de aire que se puede introducir en el cilindro (y por tanto la densidad de energía de la mezcla aire/hidrógeno), hecho que repercutirá directamente en una disminución de la potencia obtenida.

3.3 *Relación aire/combustible*

La combustión teórica o estequiométrica del hidrógeno y el oxígeno se basa en el siguiente balance:



Si se tiene en cuenta el nitrógeno presente en el aire donde por cada mol de oxígeno se tendrán 3,76 moles de nitrógeno, puede plantearse la reacción como:



Teniendo en cuenta que:

- **1 mol de O₂ reacciona con 2 moles de H₂**
- **Peso atómico Hidrógeno = 1 masa H₂ = 4gr**
- **Peso atómico Oxígeno = 16**
- **Peso atómico Nitrógeno = 14**

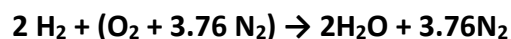
Puede deducirse que:

- **4 gr H₂ reaccionan con 32 gr O₂**
- **4 gr H₂ reaccionan con 137.28 gr de aire**

Por lo tanto, la relación entre masas será: M aire/M H₂ = 34.32

Cálculo de la relación Aire – Hidrógeno en volumen:

Recordando el balance de la reacción entre aire e hidrógeno



Se deduce que:

- **2 mol de H₂ reaccionan con 4.76 moles de Aire**
- **1 mol de H₂ reacciona con 2.38 moles de Aire**



Dado que un mol de cualquier gas ocupa el mismo volumen a igualdad de presión y temperatura se deduce que:

- **Relación Vol aire/Vol H₂ = 2.38**
- **Relación Vol mezcla/Vol H₂ = 3.38**

Por lo tanto se deduce que en un motor aspirado con formación externa de mezcla, ingresará al cilindro 29.6% de H₂ y 70.4% de aire (en volumen o número de moles).

Los cálculos demuestran que la relación estequiométrica o químicamente necesaria de aire/combustible, en términos máscicos, para la combustión completa de hidrógeno es de 34:1. Esto significa que, para producir una combustión completa, por cada gramo de combustible serán necesarios 34 g de aire. Esta es una relación mucho más elevada que la requerida en motores a nafta (14,7:1).

Dado que el hidrógeno es un combustible gaseoso en condiciones ambientales, desplazará mayor parte del volumen de la cámara de combustión que un combustible líquido. Por lo tanto, el aire podrá ocupar menos espacio de la cámara de combustión. En condiciones estequiométricas, el hidrógeno desplaza cerca del 30% del volumen total de la cámara de combustión, en comparación con cerca 10000 veces más volumen de aire que de combustible en el caso de utilizar nafta.

Estimación de la potencia desarrollada en comparación con nafta

Para realizar esta estimación, se calcularán los calores disponibles en un litro de mezcla con cada combustible.

Cálculo del calor disponible en 1 litro de mezcla estequiométrica aire – nafta.

El poder calorífico Inferior de la nafta es de 43.4 MJ/kg, el balance estequiométrico para este combustible da una relación de 14.7 kg de aire por cada kg de nafta y teniendo en cuenta las densidades del aire y de la nafta que se detallan a continuación se puede deducir la relación volumétrica entre aire y nafta.

$$\rho_{\text{aire}} = 1.18 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{nafta}} = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{nafta}} / \rho_{\text{aire}} = 678$$

$$\text{Vol aire} / \text{Vol nafta} = 14.7 \times 678 = 9966$$

1 Litro de mezcla contiene 1/9966 litros de nafta, teniendo en cuenta la densidad de la nafta se puede deducir que en 1 litro de mezcla hay 0.0802 gramos de nafta

- **1/9966 litros x 800 g/L = 0.0802 gramos de nafta**



El calor generado por esa cantidad de nafta se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Calor generado} = 0.0802\text{g} \times 43.4 \text{ kJ/g} = 3.48 \text{ kJ}$$

Esta es la cantidad de calor generado por el combustible existente en un litro de mezcla estequiométrica aire – nafta. A continuación se realizará el cálculo para el caso de hidrógeno con el fin de poder estimar la relación entre ambas cantidades.

Cálculo del calor disponible en 1 litro de mezcla estequiométrica aire - Hidrógeno

El poder calorífico Inferior de la nafta es de **119.88 MJ/kg**, el balance estequiométrico para este combustible da una relación de 34.32 kg de aire por cada kg de H₂ y teniendo en cuenta las densidades del aire y del hidrógeno que se detallan a continuación se puede deducir la cantidad de calor que aporta el hidrógeno.

$$\rho \text{ aire} = 1.18 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho \text{ H}_2 = 0.08201 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho \text{ H}_2 / \rho \text{ aire} = 0.0695$$

Tal como se demostró anteriormente, en un motor aspirado con formación externa de mezcla, ingresará al cilindro 29.6% de H₂ y 70.4% de aire (en volumen o número de moles) por lo que el volumen de hidrógeno en 1 litro de mezcla será:

$$\text{Vol H}_2 = 0.296 \text{ Litros}$$

Teniendo en cuenta el poder calorífico y la densidad, puede calcularse el calor generado:

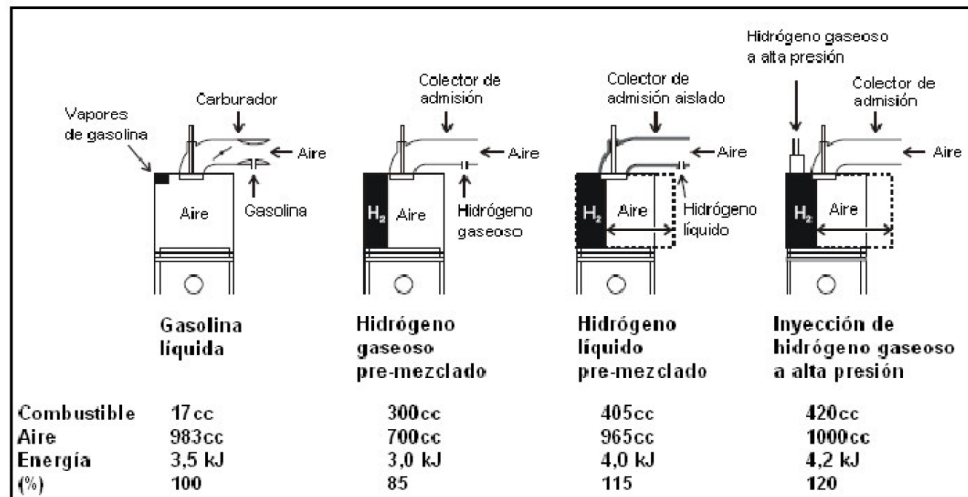
$$\text{Calor generado} = 0.296 \text{ Litros} \times 0.08201 \text{ g/L} \times 119.88 \text{ kJ/g} = \underline{2.91 \text{ kJ}}$$

La relación entre calores aportados en el caso de la nafta y el hidrógeno será:

$$Q \text{ Nafta} / Q \text{ H}_2 = 3.48 \text{ kJ} / 2.91 \text{ kJ} = 1.19$$

Por lo tanto, a pesar de que el hidrógeno posee un mayor poder calorífico, su baja densidad hace que la potencia entregada sea algo menor. Un motor a Nafta desarrollará un 19 % más de potencia que usando H₂ si se mantuviera el rendimiento

En la figura de siguiente se comparan los volúmenes de la cámara de combustión y el contenido en energía para motores a hidrógeno y a nafta.



Dependiendo del método que se utilice para introducir el hidrógeno en la cámara de combustión, la energía obtenida a la salida, comparada con la obtenida en un motor a nafta (100%), variará desde el 85% (inyección por el colector de admisión) hasta el 120% (inyección a alta presión).

Debido al amplio rango de inflamabilidad del hidrógeno, los motores que utilicen este combustible podrán funcionar con relaciones de aire/combustible desde 34:1 (estequiométrica) hasta 180:1. La relación aire/combustible puede expresarse también en términos de relación equivalente, denominado por (Φ). Φ es igual a la relación aire/combustible estequiométrica dividida por la relación real. Para una mezcla estequiométrica, la relación aire/combustible real es igual a la relación real, con lo que Φ se iguala a la unidad (1). Para relaciones aire/combustible pobres, Φ valdrá menos que la unidad.

Por otra parte, mediante el uso de un turbocompresor instalado en el sistema de escape del motor, se tiene la posibilidad de suministrar mayor cantidad de aire en el interior del motor. No obstante, si se hace uso de un turbocompresor, se debe tener en cuenta que, aparte de suministrar mayor cantidad de aire en el interior del cilindro, esto se hará a mayor temperatura.

Si se refrigera el aire entre el compresor y el motor se logra un aumento aún mayor del rendimiento volumétrico, para ello se utiliza un interenfriador o "intercooler". En motores de encendido por chispa, el interenfriador es de uso extendido ya que si no se baja la temperatura de admisión a valores razonables, se aumenta notablemente la posibilidad de que se produzca detonación (se recomienda una temperatura máxima de admisión para esta aplicación de 60°C)



3.4 *Problemas y soluciones del preencendido*

El principal problema que ha surgido con el desarrollo de los motores que operan con hidrógeno es la ignición prematura del mismo. La ignición prematura es un problema mucho mayor en motores de hidrógeno que en cualquier otro tipo de motores de combustión interna, debido a la menor energía de ignición del hidrógeno y un mayor rango de inflamabilidad.

Tanto en los motores alimentados por nafta como en los que funcionan a base de hidrógeno, el mecanismo por el cual se produce el preencendido es el mismo. En cualquiera de los dos casos, los gases de entrada encuentran una fuente de calor con la suficiente intensidad como para iniciar el proceso de combustión de la mezcla mientras la válvula de admisión se encuentra todavía abierta, y cuando todavía no se ha producido el salto de la chispa de la bujía. Las posibles fuentes de calor pueden ser una zona de alta temperatura en la cámara de combustión, como por ejemplo la propia bujía, algún defecto en la cámara de combustión, sustancias depositadas incandescentes, o los propios gases de escape, los cuales conservan una temperatura suficiente para producir la ignición de la mezcla entrante.

Gracias a una serie de experimentos, se ha logrado eliminar algunas de estas posibles causas del preencendido en motores de combustión interna de hidrógeno. La disminución de puntos calientes en la cámara de combustión ayuda a minimizar el fenómeno, sin embargo, siempre existe la fuente de ignición constituida por los gases residuales de la combustión previa

Para comprender este fenómeno, debemos recordar que al finalizar la carrera de escape de un motor de 4 tiempos, con el pistón en las cercanías del punto muerto superior, el cilindro contiene gases residuales de la combustión. Estos gases están a elevada temperatura, por encima de la de autoencendido de los combustibles convencionales como la nafta o el gas natural comprimido (GNC) y entran en contacto con la mezcla proveniente del tubo de admisión en el momento en que se comienza a abrir la válvula de admisión por lo que potencialmente podrían encenderla.

La zona en la que se comienzan a mezclar los gases residuales y los de admisión es en la que podría generarse la combustión y allí entran en juego los parámetros que gobiernan el inicio de una potencial combustión siendo estos, la temperatura de autoencendido, la energía de ignición, el tiempo de retardo y el efecto refrigerante de la mezcla de admisión sobre los gases residuales.

La temperatura de ignición es la necesaria para que una mezcla de aire y combustible comience a quemarse si se la calienta homogéneamente, en caso de un encendido localizado, como es el caso de una bujía, es necesario no sólo alcanzar una determinada temperatura sino que además hay que aportar un mínimo de energía de ignición. Esto explica por qué una bujía con una chispa “débil” puede resultar ineficaz



para encender una mezcla de aire y nafta aún cuando su temperatura supera ampliamente la de inflamación.

Cuando una mezcla de aire y combustible es sometida a condiciones de autoinflamación, es necesario además mantener esas condiciones durante cierto tiempo para lograr la ignición. El tiempo transcurrido hasta el inicio de la combustión se denomina tiempo de retardo.

En el caso de los combustibles convencionales, la posibilidad de autoencendido al tomar contacto la mezcla de admisión con los gases residuales, se ve minimizada debido a que necesitan más energía de ignición (aunque la temperatura de ignición es más baja que la del hidrógeno). El efecto refrigerante de la mezcla de admisión sobre los gases residuales hace que antes de transcurrir el tiempo de retardo, la temperatura reinante en la zona en la que se mezclan residuales y mezcla fresca baje lo suficiente para que no exista autoinflamación.

Cuando el motor opera con mezclas muy pobres, la velocidad de quemado se ralentiza haciendo que la combustión tome buena parte de la carrera de expansión para poder desarrollarse, esto hace que la temperatura al final de la expansión sea bastante más alta que en funcionamiento normal y por ello, los gases residuales incrementen notablemente su temperatura. Esta circunstancia hace que en motores nafteros, se pueda producir retroceso de llama en la admisión cuando se opera en esta condición.

Sin embargo, cuando se opera con hidrógeno, la baja energía de ignición hace que el fenómeno de encendido de la mezcla de admisión al entrar en contacto con los gases residuales sea inevitable si se utiliza la técnica de formación de mezcla homogénea en el tubo de admisión como es habitual en los motores con carburador o de inyección.

Cuando el motor opera con carga parcial, la temperatura de los gases residuales disminuye y el efecto de contra explosión se atenúa. Por esto es que en caso de utilizar las técnicas convencionales de formación externa de mezcla, resulta difícil alcanzar altas potencias sin encontrar el problema de retroceso de llama en la admisión.

El rango de inflamabilidad del hidrógeno es mucho más amplio que el de los hidrocarburos por lo que es posible el funcionamiento con mezclas muy pobres (exceso de aire) sin que se produzcan ausencias de encendido. Las mezclas combustibles de hidrógeno y aire pueden ser tan pobres como 1/6 de la relación estequiométrica sin que aparezca inestabilidad de llama.

Esta particularidad hace que sea posible regular un amplio rango de potencia modificando riqueza de mezcla sin necesidad de estrangular la admisión con el consiguiente aumento de rendimiento operando a carga parcial en comparación de lo que sucede con el uso de nafta debido a la minimización del trabajo de bombeo.

El hidrógeno tiene un poder calorífico muy alto (119.88 MJ/kg) en comparación con la nafta cuyo poder calorífico inferior es de 43.4 MJ/kg. A pesar de este hecho, un motor operando con hidrógeno sólo podría alcanzar aproximadamente un 80% de la potencia alcanzada con nafta debido a que, por tener una densidad muy baja, el combustible ocupa un gran volumen del cilindro ocasionando una merma de la cantidad de aire que



ingresa al mismo. Esta comparación se realiza sin tener en cuenta que debido al alto número octánico del hidrógeno, podría aumentarse notablemente la relación de compresión, aumentando el rendimiento y por lo tanto la potencia entregada.

Para lograr una mezcla estequiométrica son necesarios 14.7 gramos aire por cada gramo de nafta, en el caso del hidrógeno, son necesarios 34.32 gramos de aire por gramo de combustible. La densidad en condiciones standard del aire es de 1.18 kg/m³ mientras que la del hidrógeno en las mismas condiciones es de 0.08201 kg/m³ por esto es que, durante el llenado del cilindro entra una cantidad de hidrógeno muy pequeña en masa haciendo que la potencia sea menor que la esperable en un motor similar operando con nafta.

El problema de retroceso de llama se ha abordado de diferentes maneras en los motores que utilizan este combustible, una de ellas es la inyección directa en cámara de combustión, en este caso, se resuelven dos problemas simultáneamente, por una parte, se aspira sólo aire durante el proceso de admisión, diluyendo y refrigerando los gases residuales. Posteriormente, durante la etapa de compresión, se inyecta el hidrógeno a presión dentro del cilindro.

De esta manera, se resuelve el problema de retroceso de llama y también el de la merma de potencia, se logra en este caso una potencia mayor que la que se tendría con nafta, con un incremento del orden del 15%.

La otra técnica se basa en aspirar aire puro en la primera etapa del proceso de admisión, luego inyectar hidrógeno en cercanías de la válvula y posteriormente seguir aspirando aire hasta el final del proceso de llenado del cilindro. La primera etapa en la que solo ingresa aire, diluye y refrigera los gases residuales permitiendo que al ingresar hidrógeno, no existan condiciones de autoinflamación. Esta última técnica es la que se utilizó en el motor que se describe en el presente trabajo al que se le modificó el conducto de admisión instalándose inyectores de combustible gaseoso adaptados de un equipo comercial para GNC.

Se utiliza un tubo de hidrógeno comercial con 150 bares de presión y a través de una válvula reguladora se adecúa la presión a 4 bares para alimentar los inyectores comandados electrónicamente. El proceso de inyección presenta algunas particularidades que deben ser tenidas especialmente en cuenta, una vez definida la presión de suministro a los inyectores y conociendo el coeficiente de descarga se puede estimar el tiempo de inyección necesario para una adecuada dosificación del hidrógeno. Al comenzar a inyectar combustible, debido a la bajísima densidad del mismo, puede ocurrir que se inyecte a una tasa superior a la demanda volumétrica que se genera en el cilindro al ir bajando el pistón por lo que podría existir un retroceso de parte del hidrógeno inyectado. En principio, podría pensarse que ese hidrógeno sería reabsorbido posteriormente a medida que avanza el proceso de admisión y aumenta la velocidad de la carga admitida. Sin embargo, la alta difusividad del gas genera la posibilidad de que este retroceso sea excesivo y parte de hidrógeno quede en el tubo de admisión favoreciendo el proceso de retroceso de llama en el siguiente ciclo.



Si se diseña el sistema de inyección para las condiciones de máximo gasto másico global a inyectar (máxima carga y RPM), se determinará una presión de alimentación al inyector capaz de suministrar un gasto másico adecuado evitando el retroceso de hidrógeno antes mencionado. Si se mantiene esta presión al funcionar con máxima carga pero a bajas RPM, se debería inyectar durante un período muy corto con un gasto másico instantáneo relativamente alto por lo que se podría generar retroceso de combustible con el riesgo de que este no sea luego debidamente reabsorbido.

Se pensaron diversas estrategias para resolver este problema, una de ellas es adecuar la presión de suministro según las condiciones de operación. Esta técnica se desechó porque en la instalación desarrollada se cuenta con una reguladora de presión de accionamiento manual y debería regularse para cada condición de operación.

Otra posibilidad es intentar modular la apertura del inyector que, si bien está pensado como una válvula SI/NO, podría alimentarse con un tren de pulsos haciendo que en vez de una única inyección, la misma se haga en forma de ráfaga. En el trabajo desarrollado, se ha utilizado otra opción consistente en colocar dos inyectores y, manteniendo constante la presión de suministro, usar ambos en las condiciones de máxima demanda de caudal másico (alta carga y máximas RPM) y desactivar uno en condiciones en las que se podría producir retroceso de combustible (alta carga y bajas RPM).

3.5 *Evolución técnica de los motores de nafta a hidrógeno*

La configuración del motor de hidrógeno es conceptualmente la misma que la de los motores de combustión interna alternativos de combustibles clásicos (cilindros, pistones, cigüeñal, sistema de refrigeración y demás elementos constructivos). De esta manera, el desarrollo de un motor de combustión interna de hidrógeno puede hacerse a partir de un motor existente realizándole las modificaciones necesarias para el correcto funcionamiento con este combustible. Cuando se pretende optimizar el funcionamiento, las modificaciones son mayores debido a que si solo se pretende un funcionamiento "dual" (hidrógeno o nafta) no se estarían aprovechando algunas de las potenciales mejoras que se pueden obtener de un motor específicamente diseñado para hidrógeno debido a su mayor poder antidetonante y a la posibilidad de trabajar con mezclas muy pobres.

Algunas de las modificaciones que deben evaluarse para la adaptación de un motor existente para el uso de hidrógeno son las siguientes:

Control del aceite del motor

Uno de los objetivos principales de este tipo de motores es reducir drásticamente las emisiones contaminantes. Por este motivo, se pretende minimizar el consumo de



aceite, que, termina quemándose en la cámara de combustión, produciendo sus consiguientes emisiones. Para tratar de evitarlo se deberá:

- Cuidar mucho más las tolerancias de cilindridad y rugosidad, además de utilizar un tipo de aceite más adecuado.
- Utilizar un tipo de pistones diferentes con tal de disminuir la expansión térmica. En algunas aplicaciones se utilizan aleaciones de aluminio – silicio hipereutécticas.

Tapa de cilindros y refrigeración

En los motores de combustión interna de hidrógeno especialmente diseñados para tal combustible, se utilizará una tapa de cilindros especialmente diseñada. Como ya se ha mencionado en puntos anteriores, el hecho de utilizar el hidrógeno como combustible obliga a tener en cuenta una serie de aspectos, como su baja energía de ignición y su amplio margen de inflamabilidad. Debido a esto, hay que evitar las zonas excesivamente calientes en la cámara de combustión del motor.

Sistemas de ignición

Debido al bajo límite de energía de ignición del hidrógeno, es fácil producir su ignición, y se pueden aprovechar los sistemas de ignición de los motores de combustión interna a nafta. En las más pobres relaciones aire/combustible (entre 130:1 y 180:1) la velocidad de la llama se reduce considerablemente y es preferible utilizar un sistema de doble bujía y aumentar la turbulencia para paliar la baja velocidad de combustión.

Las bujías para los motores de hidrógeno deben estar clasificadas como frías y cuyos extremos no sean de platino. Una bujía fría es aquella que transfiere el calor desde el extremo de la misma al cuerpo de manera más rápida que una de tipo caliente. Esto significa que la posibilidad de que la punta de la bujía produzca la ignición de la mezcla de aire/combustible es reducida. Las bujías de tipo caliente están diseñadas para mantener una cierta cantidad de calor, con lo que no se acumulan restos carbonosos. A diferencia de los hidrocarburos, existe ausencia total de carbono al utilizar hidrógeno, por esto, las bujías de tipo caliente no presentan un interés especial en este tipo de motores. Las bujías de platino tampoco son recomendables, ya que el platino podría actuar como catalizador de la ignición.



Cambios estructurales

En el caso de que se decida aumentar la relación de compresión, eventualmente se deberá realizar una serie de cambios estructurales para que los motores puedan funcionar con hidrógeno reforzando los elementos del mismo.

Sistemas de suministro de combustible

Existen tres sistemas de suministro de hidrógeno al motor: *carburación, por conducto e inyección directa*.

- *Carburación*

El método más simple de entregar combustible al motor es utilizando un carburador. Además de resultar el método más simple, es el que mejor permite pasar de un motor a nafta a un motor a hidrógeno. Otra ventaja que supone emplear la carburación en un motor de combustión interna de hidrógeno es que no se requiere una presión de suministro del combustible tan elevada como en otros métodos de suministro.

El inconveniente de la carburación es que resulta más susceptible a la combustión irregular, problemas de preencendido y retroceso de llama.

La mayor cantidad de mezcla aire/hidrógeno dentro del conducto de admisión agrava los efectos del preencendido.

- *Sistemas de inyección por conducto (PIF, "Port Injection Fuel")*

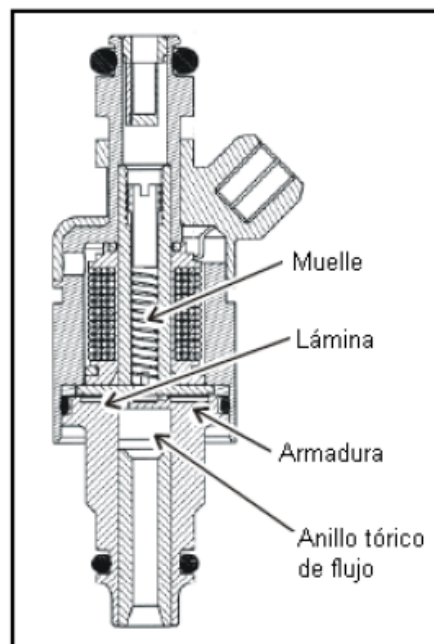
El sistema de suministro de combustible por conducto inyecta el combustible directamente dentro del conducto de admisión en cada orificio de admisión, en vez de introducir el combustible en un único punto. Normalmente, el combustible se inyecta en el conducto después del inicio de la carrera de admisión. De esta manera se reducen las posibilidades de que se produzca el preencendido del hidrógeno, ya que el aire que haya entrado en la cámara de combustión habrá enfriado algo el recinto y por consiguiente todos aquellos puntos o zonas calientes que pudieran comportarse como fuente de ignición.

En este sistema, el aire se suministra al motor por separado al inicio de la carrera de admisión, para, como ya se ha mencionado anteriormente, diluir los gases residuales y refrescar cualquier punto caliente que haya podido quedar. Puesto que en el conducto de admisión habrá menos gas (aire o hidrógeno) en cualquier instante, cualquier preencendido que se produzca será mucho menos grave. La presión de suministro a la

entrada por el orificio de admisión tiende a ser mayor que en un sistema de carburación o en un sistema de inyección central, pero menor que en los sistemas de inyección directa.

El sistema de inyección a volumen constante (CVI, Constant Volume Injection) utiliza un dispositivo mecánico accionado por levas para elegir el instante en el cual se debe inyectar hidrógeno en cada cilindro. La leva acciona una válvula de geometría similar a la de admisión pero de un tamaño mucho menor encargada de descargar el hidrógeno en la admisión del motor en el momento adecuado.

El sistema de inyección electrónica de combustible (EFI, Electronic Fuel Injection) calcula la cantidad de hidrógeno que debe introducirse en cada cilindro. Este sistema utiliza inyectores electrónicos de combustible individuales (válvulas solenoides) para cada cilindro. Mientras que el sistema CVI utiliza la sincronización constante y una presión variable en el conducto del combustible, los sistemas EFI utilizan una sincronización variable y una presión constante en dicho conducto. En la imagen podemos observar un inyector electrónico de combustible.



Inyector electrónico de combustible

- *Inyección directa (DI, "Direct Injection")*

Los motores más sofisticados de combustión interna de hidrógeno utilizan sistemas de inyección directa en el cilindro durante la carrera de compresión. En la inyección directa, la válvula de admisión se encuentra cerrada cuando se inyecta el combustible,



evitando así por completo el problema del preencendido durante la carrera de admisión. Consecuentemente, no se producirá retroceso de llama hacia el conducto de admisión.

La potencia obtenida usando un sistema de inyección directa en un motor de hidrógeno es un 20% mayor que en un motor a nafta, y un 42% mayor que en el caso de usar carburador en un motor de hidrógeno.

Aunque la inyección directa solventa el problema del preencendido en el conducto de admisión, no necesariamente previene el efecto del preencendido en la cámara de combustión. Además, debido al reducido tiempo de mezcla del aire y del combustible en un motor de inyección directa, la mezcla aire/combustible puede no ser del todo homogénea. Algunos estudios aseguran que este tipo de inyección puede llegar a producir mayores emisiones de NOx que un sistema de inyección no directa. Los sistemas de inyección directa requieren, además, una mayor presión del conducto de combustible que otros sistemas.

Otro aspecto a tener en cuenta de la inyección del combustible en los motores de hidrógeno, es que ésta puede realizarse de dos maneras en cuanto a temperaturas se refiere, inyectando hidrógeno a temperatura ambiente o bien criogenizado. Éste último tiene la ventaja de que al entrar el combustible a una temperatura extremadamente baja en la cámara de combustión, se potencia el llenado del cilindro, lo que se traduce en un aumento de potencia y rendimiento del motor, que llegará a equipararlo a los actuales motores de combustión interna a nafta. Esta técnica es utilizada por BMW en sus motores a hidrógeno (BMW Hydrogen 7)

Ventilación del cárter del motor

La ventilación del cárter del motor resulta mucho más importante en los motores de combustión interna a hidrógeno que en los motores a nafta.

Como en los motores a nafta, el combustible sin quemar puede filtrarse por los aros del pistón y entrar en el cárter del motor. Puesto que el hidrógeno tiene un límite de energía de ignición más bajo que la nafta, el hidrógeno que no se haya quemado y que pueda entrar en el cárter del motor tiene una alta probabilidad de incendiarse. Se debe prevenir la acumulación de hidrógeno en esa zona mediante la ventilación.

Cuando el hidrógeno se incendia dentro del cárter del motor, lo que ocurre es que se produce una subida repentina de la presión. Para aliviar esta presión debe instalarse una válvula de descarga de presión.

Los gases de escape también se pueden filtrar a través de los aros del pistón hacia el cárter del motor. Puesto que las emisiones que se producen en la combustión del hidrógeno en un motor son vapor de agua, el agua puede condensarse en el cárter del motor si no se tiene una ventilación adecuada. Si se llegase a mezclar el agua



condensada con el aceite del motor, se reduciría su capacidad de lubricación, dando como resultado un mayor desgaste del motor.

Sistema de escape

El principal problema que nos encontraremos en el sistema de escape es la gran cantidad de agua que generará la combustión del hidrógeno en el interior del motor. El sistema de escape deberá estar diseñado de tal manera que el agua generada pueda circular a través de él y sea expulsada por la salida del sistema.

Deberá prestarse especial atención también a los materiales de dicho sistema, ya que deberán ser capaces de resistir a la corrosión. Además, el sistema de escape deberá estar diseñado de tal manera que el agua generada no pueda quedarse estancada en ningún lugar a lo largo de su recorrido hasta ser expulsada a la atmósfera, ya que, en el supuesto de que esto ocurriera y añadiendo además el hecho de encontrarse en algún lugar de clima frío, el agua estancada podría llegar a helarse en su interior y provocar daños.

Aceite lubricante

Uno de los problemas que nos podemos encontrar con el aceite lubricante es que, debido a la gran cantidad de agua generada por el motor al consumir hidrógeno, el aceite pueda degradarse por la contaminación con el agua perdiendo calidad como lubricante.

Por otro lado, es necesario reducir al máximo las emisiones de hidrocarburos (que pueden llegar a formarse debido a la reacción del hidrógeno con el aceite del motor, al haberse descompuesto éste último), con lo que se tratará de utilizar lubricantes sintéticos de baja volatilidad a elevadas temperaturas.

3.6 *Eficiencia térmica*

El rendimiento termodinámico teórico de un motor de ciclo Otto se basa en la relación de compresión del motor y la relación de calores específicos a presión y volumen constante del fluido operante. Para el caso de un ciclo teórico se supone que este es aire durante todo el desarrollo del mismo cuando en realidad durante la admisión y compresión es una mezcla de aire y nafta (caso de motor con carburador) y durante la expansión y el escape son gases producto de la combustión.

Dado que las propiedades termodinámicas de estos gases no difieren demasiado de las del aire, suele considerarse el estudio del ciclo ideal como una primera aproximación al comportamiento del ciclo real y representa una buena base para el análisis cualitativo del mismo.



En el ciclo ideal se supone que el fluido operante es siempre el mismo por lo que el proceso de combustión se idealiza como una transferencia de calor aportada al aire a volumen constante en el PMS y el escape espontáneo como una cesión de calor a volumen constante en el PMI. Con estas suposiciones se demuestra que el rendimiento del ciclo es el siguiente:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}}$$

Donde:

V_1/V_2 = relación de compresión

γ = relación de calores específicos a presión y volumen cte = C_p/C_v

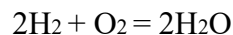
η_t = rendimiento termodinámico teórico

El valor de γ para el hidrógeno es muy similar al del aire por lo que durante la compresión, la mezcla de ambos no difiere sustancialmente en cuanto a sus propiedades termodinámicas respecto de la del aire. Durante la expansión, el vapor recalentado producto de la combustión también puede considerarse equivalente al aire por lo que igualmente puede considerarse como una razonable primera aproximación al ciclo ideal al utilizar hidrógeno como combustible.

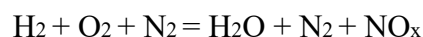
Cuanto mayor sea la relación de compresión y/o la relación de calores específicos, mayor será el rendimiento termodinámico teórico del motor. El límite de relación de compresión de un motor se basa en la resistencia del combustible a sufrir detonaciones. Aún cuando el ciclo real difiere del teórico, la tendencia a aumentar el rendimiento con la relación de compresión se mantiene y siempre es una variable de importancia siempre que el combustible permita aumentarla. El hidrógeno es menos susceptible a producir detonaciones que la nafta convencional y más aún en el caso de mezclas pobres, con lo que puede resistir mayores relaciones de compresión.

3.7 Emisiones

La combustión del hidrógeno con oxígeno únicamente produce agua como producto resultante:



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



Los óxidos de nitrógeno se crean debido a las altas temperaturas generadas dentro de la cámara de combustión durante la misma. Estas altas temperaturas provocan que una parte del nitrógeno del aire se combine con el oxígeno. En general, el oxígeno



reaccionará antes con el combustible que con el nitrógeno, sin embargo, si hay abundancia de oxígeno y alta temperatura puede producirse la reacción que genera NOx.

Esto explica que con mezclas muy pobres no tienda a aparecer NOx debido a las bajas temperaturas de combustión pero a medida que se aumenta la riqueza de combustible aumenta la producción de NOx debido al aumento de la temperatura. Sin embargo, cuando la mezcla se acerca a la relación estequiométrica, los NOx vuelven a bajar producto de que el oxígeno es más reactivo con el combustible que con el nitrógeno.

Esta es una de las explicaciones del uso de recirculación de gases de escape (EGR "Exhaust Gas Recirculation) intentando sustituir el nitrógeno por un gas totalmente inerte durante el funcionamiento de motores con mezcla pobre.

La cantidad de NOx generado depende de:

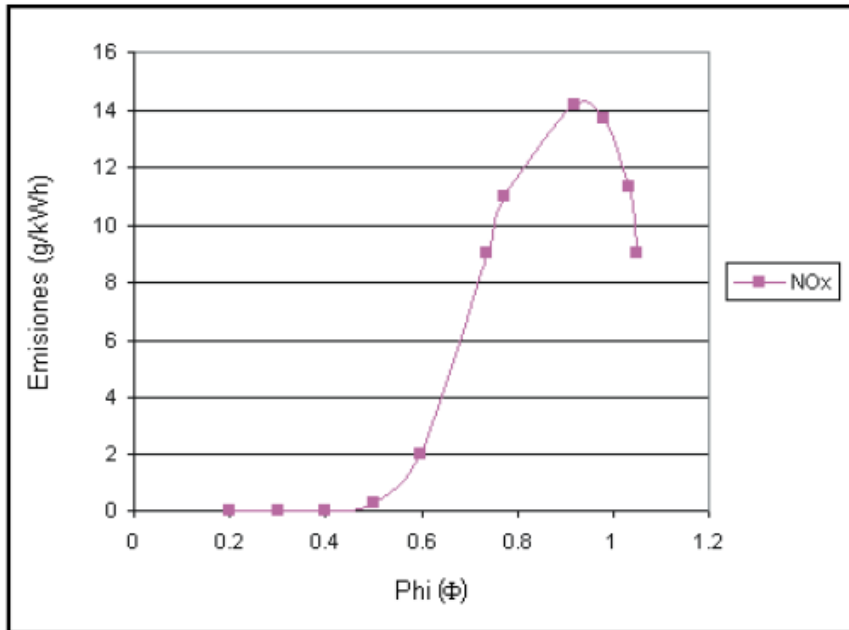
- La relación aire/combustible.
- La relación de compresión del motor.
- Velocidad del motor.
- Regulación del encendido.
- Presencia de gases residuales de combustión anterior (residuos de barrido o EGR).

Además de los óxidos de nitrógeno, puede haber restos de monóxido de carbono y de bióxido de carbono en los gases de escape, debido al filtrado de aceite dentro de la cámara de combustión.

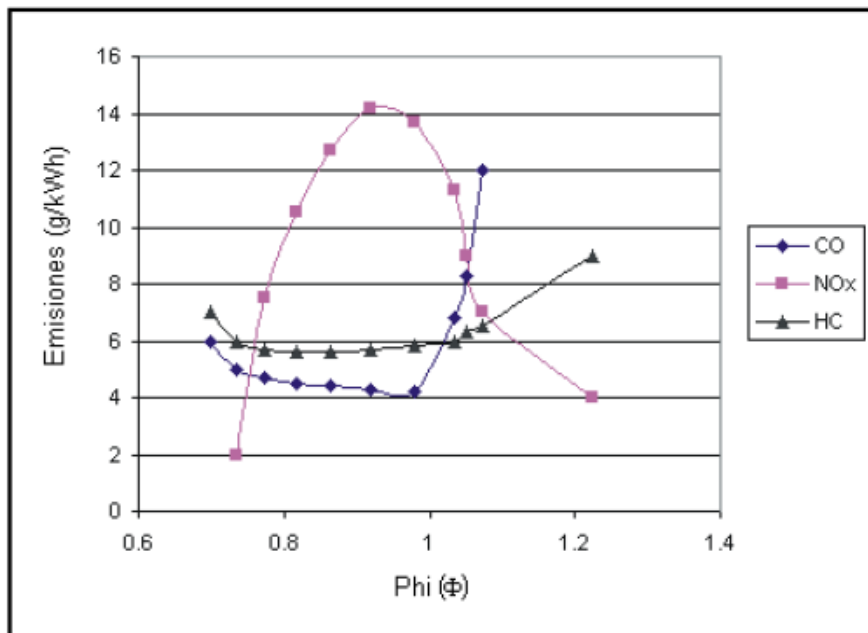
Dependiendo de la condición del motor (quemado de aceite) y de la operación estratégica utilizada (una mezcla aire/combustible rica frente a una pobre), un motor de hidrógeno puede pasar de producir emisiones casi cero (tan bajas como alguna ppm), a llegar a producir emisiones significativas de NOx y monóxido de carbono.

El uso de un catalizador puede minimizar la presencia de contaminantes, cabe destacar que los de tres vías necesitan que el motor trabaje con mezcla estequiométrica y se presenta la disyuntiva en el caso del motor a hidrógeno de perder la posibilidad de trabajar con mezclas pobres donde habría que utilizar las estrategias de los motores Diesel en cuanto al uso de catalizador de dos vías y egr. Independientemente de las posibilidades de utilizar catalizador, siempre resulta deseable optimizar el funcionamiento del motor de tal manera que produzca la menos cantidad de contaminantes posible.

En las dos imágenes siguientes se comparan las emisiones producidas por un motor alimentado por hidrógeno frente a otro alimentado con nafta en función de la relación combustible/aire normalizada (ϕ) conocida también como dosado relativo. Los valores menores que la unidad representan mezclas pobres y los mayores a la unidad, mezclas ricas.



Emisiones en un motor de hidrógeno



Emisiones en un motor de gasolina



3.8 *Potencia obtenida*

La potencia obtenida en un motor de hidrógeno dependerá de la relación aire/combustible y del sistema de inyección de combustible utilizado.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la relación estequiométrica aire/combustible en masa para el hidrógeno es 34:1. Con esta relación aire/combustible, el hidrógeno desplazará el 29% del volumen de la cámara de combustión, dejando el 71% restante para el aire. Como resultado, el contenido en energía de esta mezcla será menor que si el combustible fuese nafta (puesto que la nafta es un líquido, ocupará un volumen mucho menor en la cámara de combustión, permitiendo que entre mayor cantidad de aire).

Ya que tanto el método de carburación como la inyección en el conducto de admisión mezclan el aire y el combustible antes de que entren en la cámara de combustión, estos sistemas limitan la potencia teórica máxima obtenible a aproximadamente un 85% de la obtenida en los motores a nafta. Para los sistemas de inyección directa, que mezclan el combustible con el aire después de que la válvula de admisión se haya cerrado (disponiendo de esta manera la cámara de combustión del 100% de aire), la potencia máxima a la salida del motor puede ser aproximadamente un 15% mayor que la de los motores a nafta.

Por lo tanto, dependiendo de la manera en que se introduzca el combustible en la cámara de combustión, la potencia máxima a la salida de un motor de hidrógeno podrá ser un 15% mayor o menor que en el caso de un motor a nafta con una relación aire/combustible estequiométrica. Sin embargo, con una relación aire/combustible estequiométrica, la temperatura de la combustión será muy elevada, dando como resultado la formación de óxidos de nitrógeno (NOx).

Los motores de hidrógeno pueden operar normalmente con dos veces más aire del teóricamente requerido para producir una combustión completa. Con esta relación aire/combustible, la formación de NOx se reduce casi a cero. Desafortunadamente, este hecho reducirá también la potencia máxima a la salida hasta más o menos la mitad de la que se conseguiría con un motor a nafta de las mismas características. Para compensar la pérdida, los motores de hidrógeno son generalmente más grandes que los motores a nafta y pueden operar con relaciones de compresión más altas debido al alto poder antidetonante además de la posibilidad de trabajar con sobrealimentación.



4. Objetivos del presente proyecto

4.1 *Lineamientos generales y establecimiento de objetivos*

En un principio, cuando se decidió enfrentar este trabajo, se fijó como primer objetivo lograr que un motor a nafta existente funcione utilizando hidrógeno como combustible en, al menos, un punto de funcionamiento. Al poco tiempo, una vez que se empezó a juntar información sobre las propiedades combustibles del hidrógeno y sobre los posibles sistemas de inyección que se podrían utilizar para que el motor funcione, se decidió ir un poco más allá, tanto los integrantes como los docentes involucrados en el proyecto se veían cada vez más interesados y entusiasmados en el tema.

Se pensaba entonces no sólo en hacer funcionar el motor en un punto determinado sino también construir un banco de pruebas, adaptado a las necesidades del mismo, que permita medir las prestaciones y compararlas con el uso de los diferentes combustibles (nafta vs. hidrógeno).

Luego, dado que la Universidad contaba con diferentes elementos para instrumentar el motor y el banco de pruebas sin afrontar grandes gastos económicos y siendo que se contaba con el apoyo de docentes del Departamento de Electrónica para afrontar lo correspondiente al control y medición de parámetros, fue como se llegó a abrir el abanico de objetivos en los que se incursionó.

El objetivo principal de éste proyecto se basó en evaluar las prestaciones de momento torsor y potencia en un MCIA monocilíndrico funcionando con nafta y contrastarlas con el uso de hidrógeno como combustible utilizando un sistema de inyección indirecta secuencial sin realizar cambios en los aspectos constructivos esenciales del motor (relación de compresión, sistema y reglaje de distribución, cilindrada, sistema de escape, sistema de admisión, etc.).

Como objetivos secundarios se pueden destacar los siguientes:

- Obtener el ciclo operativo del motor funcionando con hidrógeno para diferentes estados de carga fijando las RPM y buscando el avance óptimo en cada caso.
- Comparar, mediante el análisis del ciclo operativo, la velocidad de llama de ambos combustibles (nafta vs. hidrógeno).
- Obtener la potencia máxima posible utilizando la inyección secuencial indirecta de hidrógeno y compararla con la máxima posible simulando un sistema



carburado de alimentación (en el siguiente apartado se presentará cómo funciona el sistema de inyección electrónica a lazo abierto que permite representar esta situación).

5. Desarrollo

5.1 *General*

A continuación se presentará el desarrollo del trabajo realizado para cumplir con los objetivos estipulados en el apartado anterior. Para ello, no estará de más repasar el principio de funcionamiento de un MCIA y aquellos aspectos de interés en los que se estuvo profundizando a lo largo del presente proyecto.

Cabe destacar que tanto el diseño y la construcción del banco de pruebas como el sistema de control y el software de adquisición de datos para obtener los ciclos operativos fueron realizados en las instalaciones de la UNPSJB por los integrantes del proyecto y el personal docente que participó en el mismo.

5.2 *MCIA*

Marco teórico

El motor de combustión interna alternativo (MCIA), es capaz de transformar la energía en un trabajo útil. Básicamente es un mecanismo de cilindro-pistón; Dentro del cilindro se encuentra alojado el pistón el cual se ajusta a las paredes de este mediante unos anillos (aros) que impide que los gases pasen a la parte inferior del cilindro, que el lubricante (aceite) pase a la parte superior del pistón y de lograr la estanqueidad para elevar la presión dentro del cilindro durante el proceso de compresión y expansión.

El pistón se encuentra unido a una biela, la misma que trasmite la fuerza de la explosión a la manivela del cigüeñal. El cigüeñal al girar describe una trayectoria circular mientras que el pistón realiza una trayectoria rectilínea ascendente o descendente. Con este mecanismo el movimiento lineal alternativo del pistón se convierte en un movimiento de rotación mediante el eje del cigüeñal.

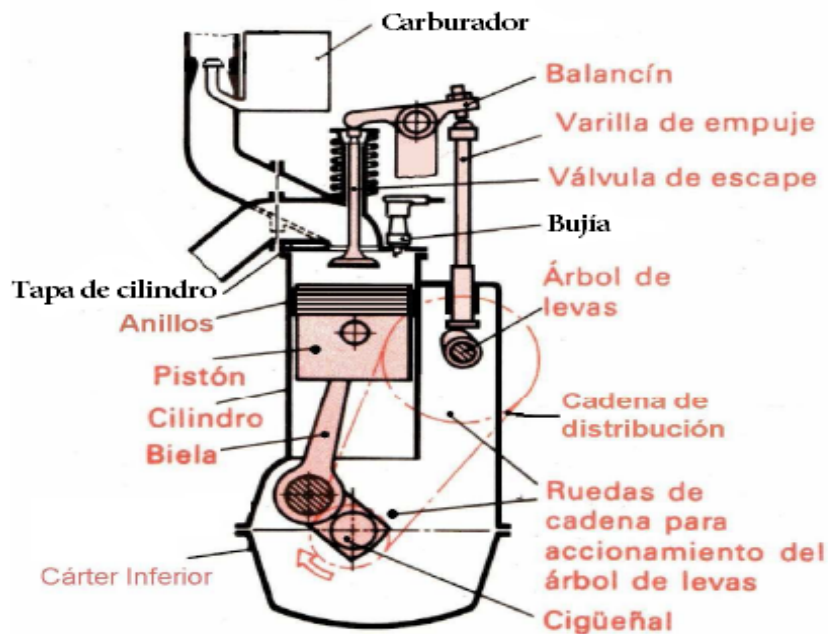
Por la parte superior del cilindro y fijada al bloque se encuentra la tapa de cilindros dentro de la cual se encuentran las válvulas. Las válvulas son accionadas por un árbol de levas, las mismas permiten la entrada y la salida de los gases en el cilindro. El árbol de levas recibe el movimiento del cigüeñal a través de una cadena, correa dentada o engranajes, y este gira a la mitad de revoluciones que el cigüeñal.

En la tapa de cilindros se encuentra alojada la bujía la cual se encarga de provocar la ignición de los gases comprimidos (combustibles) en el interior del cilindro, una

determinada cantidad de grados antes que el pistón llegue al PMS (punto muerto superior).

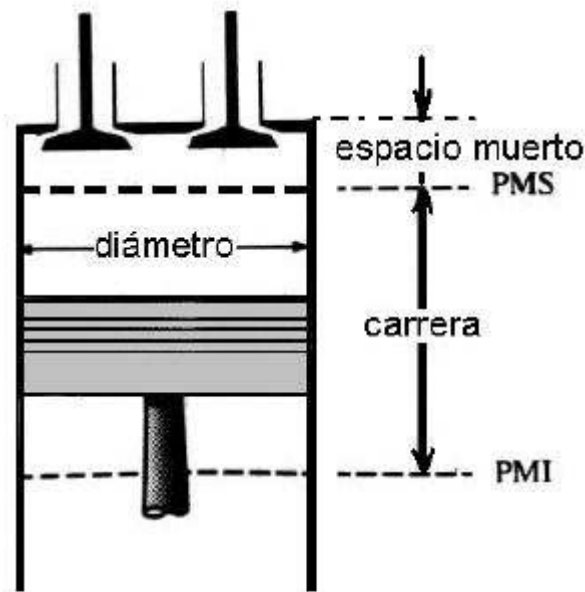
Otra parte importante es el bloque en el cual se encuentran alojados todos los mecanismos mencionados anteriormente, por su parte inferior se encuentra sellado por el cárter, dónde se aloja el aceite para la lubricación y refrigeración.

A continuación se muestra un esquema básico de un motor de combustión interna alternativo (MCIA) de encendido por chipa.



Concepto básico

El desplazamiento del pistón se realiza desde una posición máxima superior, punto muerto superior (PMS), hasta una posición mínima inferior, punto muerto inferior (PMI). La distancia recorrida entre estos dos puntos se denomina carrera. En una vuelta completa del cigüeñal, el pistón hará una carrera ascendente y una descendente.



Cilindrada o volumen de barrido (vc), es el volumen comprendido entre PMS y el PMI

$$vc = \frac{\pi}{4} \times (\text{diámetro})^2 \times \text{carrera} \quad (\text{cm}^3)$$

Área de la sección transversal A, es el área del pistón que recibe la fuerza durante la explosión, se calcula con la siguiente expresión:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (\text{diámetro})^2 \quad (\text{cm}^2)$$

Espacio muerto, es el espacio formado por la cabeza del pistón, la tapa de cilindros y el cilindro, cuando el pistón se encuentra en el PMS, este espacio se conoce también como cámara de combustión (V0). Volumen total, es la suma del volumen barrido y el volumen de espacio muerto.

Relación de compresión (r), es la relación entre el volumen total y el espacio muerto.

$$r = \frac{v_0 + v_c}{v_0}$$

Ciclo mecánico

Un motor de combustión interna alternativo realiza las siguientes operaciones en su ciclo:

30/04/2013

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica

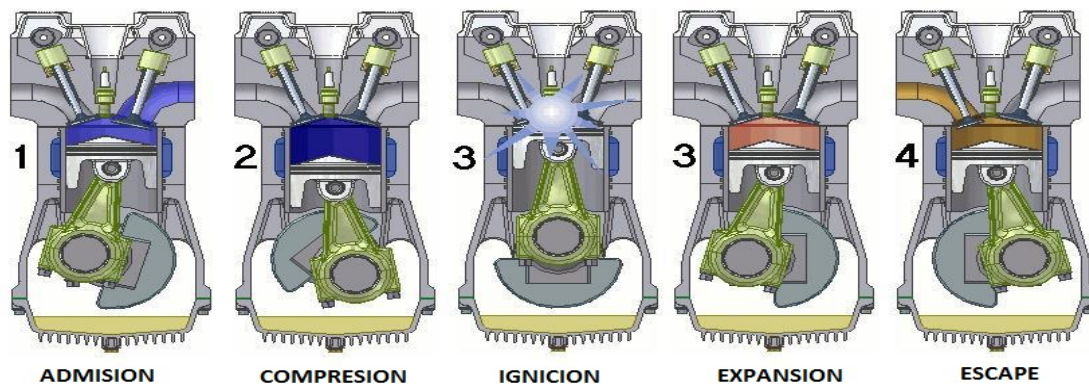
1. Ingreso del fluido de trabajo o carga.
2. Compresión de la carga.
3. Encendido de la carga.
4. Expansión de los gases de combustión y transmisión de movimiento de éstos al pistón y de él al cigüeñal.
5. Expulsión de los gases e inicio de un nuevo ciclo.

Motores de cuatro tiempos

Para continuar con la explicación de los motores de combustión interna, se presenta los motores de acuerdo al tiempo que utilizan para realizar un ciclo completo. Se lo conoce como motor de cuatro tiempos, porque necesita que el pistón se desplace entre los puntos extremos del cilindro (PMS - PMI) en cuatro ocasiones, para obtener una carrera de potencia.

Estos cuatro tiempos se relacionan con las cuatro careras necesarias para desarrollar el ciclo y no necesariamente con cuatro procesos aislados, ya que procesos como la ignición y la combustión se solapan entre el final de la compresión y el inicio de la expansión. De igual modo, la admisión puede continuar durante las primeras fases de la carrera ascendente correspondiente a la compresión debido a que se aprovechan los efectos inerciales de la carga fresca en el múltiple de admisión y se retrasa el cierre de la válvula correspondiente.

El siguiente gráfico muestra de manera simplificada los procesos involucrados en el funcionamiento de un motor de 4 tiempos.



1- ADMISIÓN:

- Se abre la válvula de admisión.
- Se puede suponer que la presión es constante, idealmente es la atmosférica.
- La mezcla aire-combustible ingresa al cilindro.
- El pistón se desplaza de PMS al PMI.



- El cigüeñal gira 180° .

2- COMPRESIÓN

- Las válvulas de admisión y la válvula de escape permanecen cerradas.
- La presión dentro del cilindro va aumentando a medida que el pistón se eleva.
- El volumen de la mezcla se reduce y se comprime.
- El pistón se desplaza de PMI al PMS.
- Se produce el salto de la chispa en la bujía un instante antes del PMS.
- Se inicia la combustión.
- El cigüeñal gira 180° más.

3- EXPANSIÓN

- Se le conoce también como carrera de explosión ó potencia.
- En el motor de encendido por chispa, se produce la combustión, y un aumento de la presión de los gases contenidos en el cilindro.
- Inmediatamente la presión de los gases de combustión, que se expanden por el descenso del pistón, disminuye.
- El pistón se desplaza desde el PMS hacia el PMI. Este desplazamiento es el único del que se obtiene trabajo.
- El cigüeñal gira 180° más.
- Las válvulas de admisión y escape permanecen cerradas.

4- ESCAPE

- La válvula de admisión está cerrada mientras que la válvula de escape se abre.
- El pistón barre los gases desde el PMI hasta PMS.
- Los gases producto de la combustión son expulsados.
- La presión es algo superior a la atmosférica y se supone constante.
- El cigüeñal gira 180° más.

Después de este tiempo el motor está listo para realizar nuevamente el ciclo.

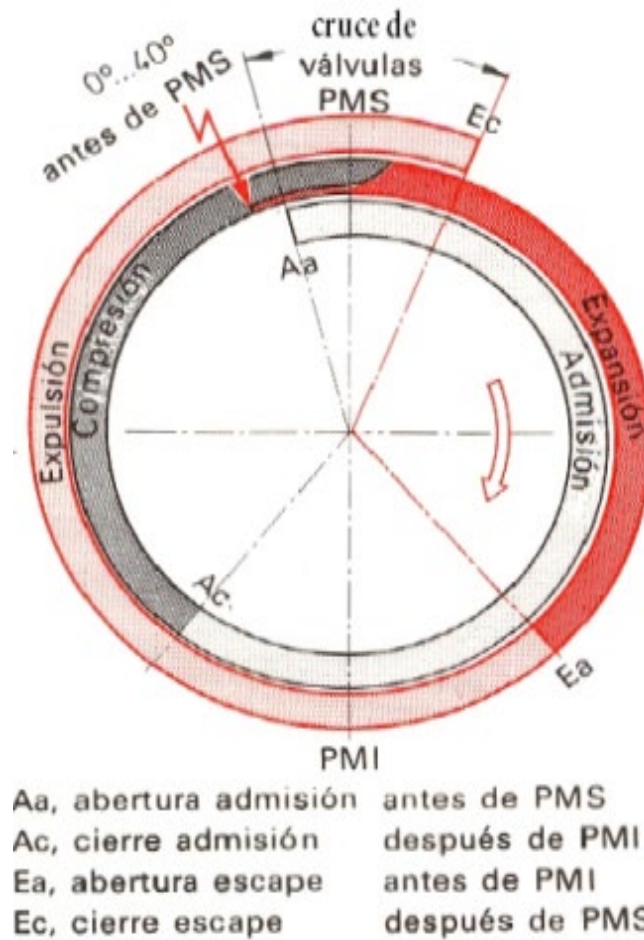
En realidad, debido a los efectos dinámicos en los conductos de admisión y de escape y a que la combustión no puede producirse de manera instantánea a volumen constante, es necesario realizar modificaciones respecto a lo descrito anteriormente en los momentos de apertura y cierre de las válvulas y en el instante de inicio de combustión, de modo que no coinciden con los PMS y PMI, sino que se produce con adelantos y retraso respecto a estos puntos.

Siguiendo la misma secuencia anterior:



- Avance a la apertura de admisión (AAA), es el ángulo girado por el cigüeñal desde el inicio de la apertura de válvulas de admisión hasta el PMS en el que teóricamente se debería abrir la válvula.
- Retraso en el cierre de la admisión (RCA), es el ángulo girado por el cigüeñal desde el PMI hasta que se cierra la válvula de admisión.
- Avance al encendido (AE) o avance a la inyección para el caso de los motorws Diesel (AI), es el ángulo girado por el cigüeñal desde el salto de chispa en la bujía o desde el inicio de la inyección de combustible hasta que el émbolo se encuentra en el PMS.
- Avance en la apertura de escape (AAE), es el ángulo girado por el cigüeñal desde el inicio de la apertura de la válvula de escape hasta el PMI.
- Retraso al cierre de la válvula de escape (RCE), es el ángulo girado por el cigüeñal desde el PMS hasta que se cierra la válvula de escape.

El ángulo durante el que permanecen abiertas las válvulas de admisión y escape se denomina ángulo de cruce de válvulas (es la suma de los ángulos de AAA y RCE). Éste cruce de válvulas permite utilizar la energía cinética de los gases de escape para obtener un barrido de la cámara de combustión.



La existencia de los ángulos de avance y de retraso se debe por un lado a los efectos no estacionarios del flujo, y a razones mecánicas, ya que no es posible abrir y cerrar las válvulas instantáneamente, por lo que para conseguir una cierta abertura en los puntos muertos, es necesario abrir antes y cerrar más tarde.

Los valores óptimos de estos ángulos dependen de las condiciones de operación del motor, sobre todo del régimen de giro, de las características constructivas del motor, número de cilindros, la disposición y dimensiones de los tubos de admisión.

Ciclo termodinámico

El ciclo termodinámico ideal correspondiente a un motor de cuatro tiempos de encendido por chispa, es el ciclo Otto. Esta es una aproximación del ciclo real muy simplista pero que refleja a grandes rasgos el funcionamiento del motor. Este ciclo teórico se plantea utilizando como fluido operante aire sin que exista combustión, no hay renovación de carga y se aporta calor desde el exterior al final de la compresión.

Al final de la expansión, se extrae calor a volumen constante, cuando en la realidad, en el motor real, al abrir la válvula de escape, cae la presión y luego son expulsados los gases al exterior. Dado que las propiedades termodinámicas del aire no difieren mucho de la de la mezcla aire combustible y de los productos de combustión, el ciclo de aire es considerado como una aproximación razonablemente buena para analizar las características generales de funcionamiento del motor de cuatro tiempos.

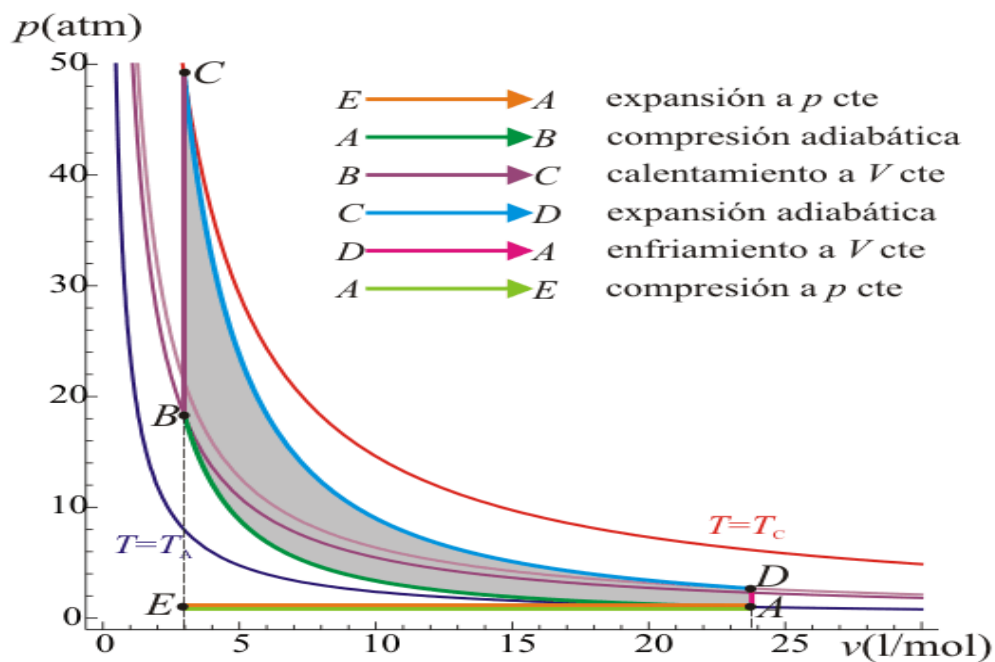
El ciclo Otto se puede apreciar en el diagrama P - v. Este ciclo se compone de cuatro procesos termodinámicos internamente reversibles.

A-B Compresión adiabática y reversible (isentrópica).

B-C Adición de calor a volumen constante.

C-D Expansión adiabática y reversible (isentrópica).

D-A Cesión de calor a volumen constante.

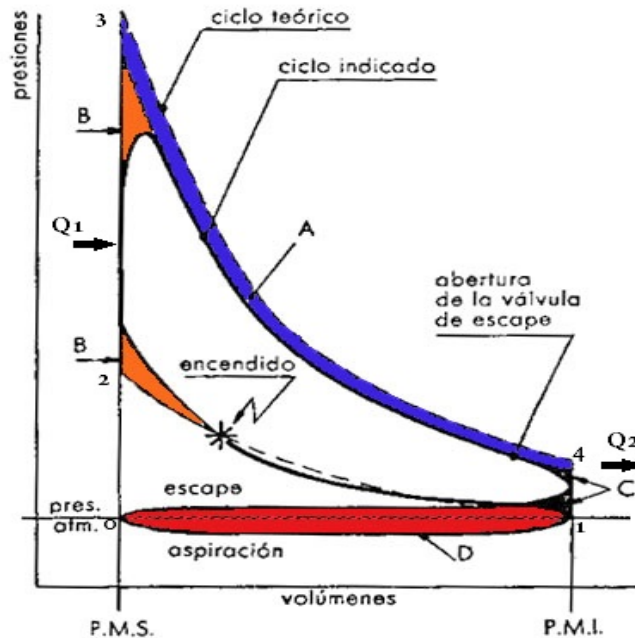


La diferencia entre los ciclos reales y teóricos

Entre un ciclo real y uno teórico, correspondiente a un motor de encendido por chispa existen, diferencias sustanciales tanto en la forma del diagrama, como en los valores de temperatura y presiones.

Por esta causa el rendimiento del ciclo real es menor y, en consecuencia, también lo es el trabajo útil desarrollado por el motor.

Las curvas de compresión y expansión tienen un perfil distinto, además, la combustión no es exactamente a volumen constante ni la caída de presión al abrir el escape es instantánea por lo que estos procesos se “redondean” en el ciclo real.



Las causas de estas diferencias son las siguientes:

- Pérdidas de calor

En el ciclo teórico son nulas las pérdidas de calor, pero bastante sensibles en el real. Cierta parte del calor del fluido operante se transmite a las paredes produciendo una disminución de presión en cada punto de la evolución de la compresión y de la expansión respecto de lo que se obtendría con una transformación adiabática.

También, debido a las fugas durante la compresión entre el pistón y el cilindro se produce una disminución de presión provocando una variación de las evoluciones similar a la debida a las fugas de calor, con lo cual, las líneas de compresión y expansión no son adiabáticas, sino politrópicas, por cuya causa existe una pérdida de trabajo útil (corresponde a la superficie A).

- Combustión no instantánea

En el ciclo real la combustión dura cierto tiempo, con lo cual no se realiza a volumen constante. Si el encendido tuviese lugar en el PMS, la combustión se realizaría cuando el pistón está bajando, con lo que el valor de presión sería menor al previsto, con la correspondiente pérdida de trabajo útil. Por esta razón es importante anticipar el encendido, de manera que la combustión se inicie antes de que el pistón alcance el PMS.



Esto produce un redondeamiento de la línea teórica 2-3 de combustión (aporte de calor) y en consecuencia, una pérdida de trabajo útil, esta pérdida resulta menor que la que tendría lugar si no se adelantara el encendido.

- Tiempo de apertura de la válvula de escape

En el ciclo real, la extracción de calor tiene lugar en un cierto tiempo y no instantáneamente, como se supone en el ciclo teórico, la válvula de escape debe abrirse un tiempo antes de que el pistón alcance el PMI. Para que la presión descienda y no se presenten dificultades en su movimiento ascendente posterior. Este hecho supone una pérdida de trabajo útil (área C), que es menor que si no hubiera AAE.

- Carrera de escape y admisión

En el ciclo real, durante la carrera de escape la presión se mantiene por encima de la atmosférica, mientras que la de admisión resulta inferior a ella. Se crea por lo tanto en el diagrama una superficie negativa D que corresponde al trabajo perdido realizado por el pistón en estas dos carreras, llamado trabajo de bombeo. Este trabajo puede ser minimizado con una correcta "sintonización" buscando los adelantos y retrasos óptimos de válvulas de admisión y escape además de diseñar convenientemente los múltiples ya que su longitud y geometría general tienen gran influencia en el proceso de renovación de la carga.

- Disociación en la combustión

Los productos de la combustión son esencialmente CO₂ y H₂O, además de otros compuestos como CO, H₂ y O₂. La disociación de los mismos es una reacción que se lleva a cabo con absorción de calor, lo que supone que la temperatura máxima alcanzable sea menor y, en consecuencia una pérdida de trabajo útil.

- Aumento del calor específico del fluido con la temperatura

El calor específico a presión constante c_p y a volumen constante c_v de un gas real crecen con la temperatura, lo que supone que los valores de presión y temperatura máxima resulten inferiores a los que se obtendrían si los calores específicos permanecieran constantes al variar la temperatura, y es por esto que los valores de presión y temperatura máximas son, en el ciclo real, inferiores a los correspondientes en el ciclo teórico.

Caracterización del motor estándar

El MCI utilizado en este proyecto corresponde a un monocilíndrico marca HONDA modelo GX - 340 de 11 HP de potencia nominal y 337 cm³ de cilindrada. Funciona originalmente con nafta como combustible y es utilizado en el mercado como fuente de poder de diferentes elementos, tales como generadores de energía eléctrica y bombas de agua principalmente. Su sistema de refrigeración es por aire.

En las figuras siguientes se muestra el catálogo brindado por el fabricante del motor donde se especifican las características principales del mismo seguido de las curvas características de momento torsor y potencia, que fueron corroboradas en el banco de ensayos fabricado obteniendo prácticamente los parámetros allí descritos.



The Next Generation of GX Engines.

GX340

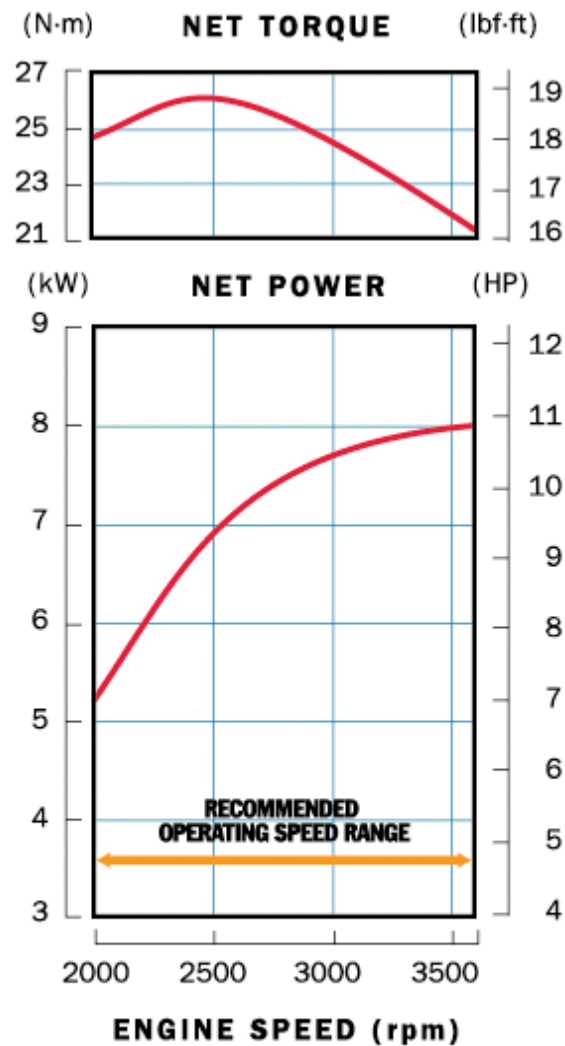
The GX340 is all new for 2010, featuring more power, quieter performance, lower fuel consumption, and lower emissions. With new features and better performance, the new GX engines establish themselves yet again as the best engines in the business.

COMMON APPLICATIONS

- Pressure washers
- Commercial lawn and garden equipment
- Tillers / cultivators
- Generators
- Forestry equipment
- Construction / industrial equipment
- Agricultural equipment
- Small vehicles
- Water pumps



Engine Type	Air-cooled 4-stroke OHV	Dimensions	
Bore x Stroke	88 X 64 mm	Length (min)	16.0" (407 mm)
Displacement	337 cm ³	Width (min)	19.1" (485 mm)
Net Power Output*	10.7 HP (8.0 kW) @ 3,600 rpm	Height (min)	17.7" (449 mm)
Net Torque	19.5 lb-ft (26.4 Nm) @ 2,500 rpm	PTO Shaft Options	
PTO Shaft Rotation	Counterclockwise (from PTO shaft side)	E type	Tapered shaft
Compression Ratio	8.2:1	H type	Reduction type PTO
Lamp/Charge coil options	25W, 50W / 1A, 3A, 10A, 18A	L type	Reduction type PTO
Carburetor	Butterfly Float Type		Threaded type
Ignition System	Digital CDI with variable timing	P type	(SAE)
Starting System	Recoil/electric	Q type	Straight shaft
Lubrication System	Splash	R type	Reduction type PTO
Governor System	Centrifugal Mass Type	V type	Tapered shaft
Air cleaner	Dual element		
Oil Capacity	1.16 US qt (1.1 L)		
Fuel Tank Capacity	6.4 U.S. qts (6.1 liters)		
Fuel	Unleaded 86 octane or higher		
Dry Weight	69 lb (31.5 kg)		



GX340/iGX340

Modificaciones realizadas

Sistema de inyección

Para definir el inyector a instalar en el sistema de inyección de hidrógeno, es necesario en primera instancia, tener una idea de los caudales máxicos que como máximo será necesario manejar. Desde un principio se definió que la mezcla estequiométrica de hidrógeno, es la mezcla más rica a alcanzar, ya que no se justificaría desperdiciar hidrógeno por el escape al obtener mezclas todavía más ricas.



Entonces, con los siguientes datos:

- Relación estequiométrica del hidrógeno:
En volumen: 70,41 % aire / 29,59 % hidrógeno
En masa: 34,33 kg aire / 1 kg de hidrógeno
- Densidad del hidrógeno en condiciones normales de presión y temperatura
 $\rho_{H_2} = 0,0899 \text{ Kg/m}^3$
- Cilindrada del motor = 337 cm^3

Y considerando los siguientes valores de manera conservadora:

- Máxima velocidad del motor = 4000 rpm (en el manual del motor figuran 3600 rpm).
- Tiempo máximo de inyección de hidrógeno = 50% de lo que dure la carrera de admisión.
- Porcentaje de llenado del cilindro = 100%
- Presión de admisión = 1 bar.
- Presión de inyección = 4 bar.

Se calcula:

Tiempo de admisión:

$$t_{adm} = \frac{60 \frac{\text{seg}}{\text{min}}}{4000 \frac{\text{rev}}{\text{min}}} \times 0,5 = 0,0075 \text{ seg}$$

Tiempo de inyección máximo:

$$t_{inymax} = 0,5 \times t_{adm} = 0,00375 \text{ seg}$$

Caudal volumétrico instantáneo de H_2 :

$$Q_{instH_2} = \frac{337 \text{ cm}^3}{0,00375 \text{ seg}} \times \frac{29,59\%}{100\%} = 26587,77 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \cong 26,58 \frac{\text{lt}}{\text{seg}}$$

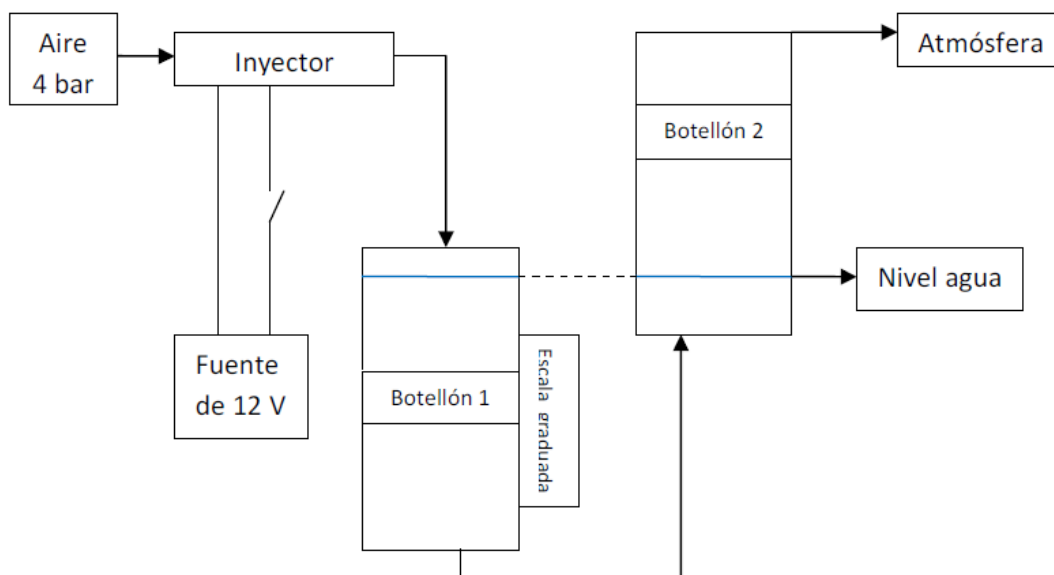
Caudal másico instantáneo de H_2 :

$$G_{instH_2} = 26587,77 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000000 \text{ cm}^3} \times 89,9 \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} = 2,39 \frac{\text{gr}}{\text{seg}}$$

Se dispuso de un inyector de nafta de Volkswagen Gol 1.6 y un inyector de GNC universal, los cuales fueron ensayados para analizar los rangos de caudal que manejaba cada uno. Con el fin de no desperdiciar hidrógeno en los ensayos se utilizó aire como fluido de prueba. La idea fue realizar los cálculos teóricos y experimentales con este fluido para obtener el coeficiente de descarga de cada inyector. Se define coeficiente de descarga como la relación entre el caudal másico ideal y el caudal másico real del inyector, vale aclarar que este coeficiente es independiente del gas que utilice el inyector. Una vez conocido este coeficiente, realizando los cálculos teóricos con hidrógeno, fue posible aproximar con bastante certeza el caudal másico real que libera cada inyector con este gas.

Se empleó un suministro de aire a 4 bar de presión y se ensayaron ambos inyectores, midiendo el volumen de aire que era capaz de liberar cada inyector en diferentes lapsos de tiempo. Si bien se conocía de antemano que el inyector de nafta no es capaz de entregar caudales ni siquiera cercanos a los requeridos, se realizó el ensayo de ante la posibilidad de optar por la utilización de varios inyectores que operen simultáneamente.

Como se puede apreciar en el siguiente esquema, el aire fue inyectado en la parte superior del botellón 1 a través de una manguera, desplazando el agua que contenida en este botellón hacia el botellón 2 que se encontraba a presión atmosférica en su parte superior. Una escala graduada ubicada en el botellón 1 permitía leer el volumen de aire inyectado. Si bien el desnivel generado produce un cambio en la presión, dado que este ensayo era para tener valores estimativos, el método resultó suficientemente preciso para el objetivo planteado.





El inyector fue alimentado utilizando una fuente de 12v, accionándolo con un interruptor, y los valores de tiempo fueron tomados con un cronómetro. Debido al error que conlleva esta maniobra el ensayo se repitió 10 veces para luego promediar resultados. Haciendo un simple cálculo se determina el caudal volumétrico en cada ensayo:

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$

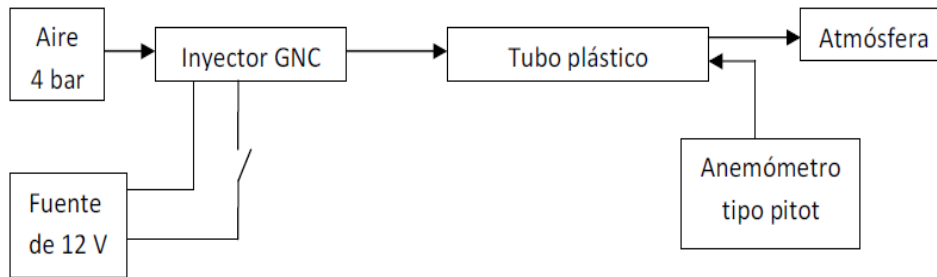
Con el inyector de nafta se obtuvieron los siguientes resultados:

Inyector nafta (con aire a 4 bar)		
Tiempo [seg]	Vol [cm ³]	Q [cm ³ /seg]
9,12	1000	109,649
9,21	1000	108,578
9,17	1000	109,051
9,2	1000	108,696
9,15	1000	109,290
9,13	1000	109,529
9,18	1000	108,932
9,13	1000	109,529
9,19	1000	108,814
9,14	1000	109,409
Promedio =		109,148

Con este valor promedio se estima el caudal másico de aire:

$$G_{\text{iny nafta}} = 109,148 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times 1205 \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} \times \frac{1}{1000000} \frac{\text{m}^3}{\text{cm}^3} = 0,1315 \frac{\text{gr}}{\text{seg}}$$

Con el inyector de GNC el ensayo no resultó confiable, ya que en un lapso muy pequeño de tiempo, difícil de medir con un cronómetro de forma precisa, inyecta tanto volumen de aire que desplaza toda el agua del primer botellón. Por este motivo se decidió utilizar otra técnica: Seguir usando aire a 4 bar de presión en la entrada del inyector y conectar la salida a un tubo plástico de 50 cm de largo y 5,1 cm de diámetro interno donde fue ubicado un anemómetro tipo pitot para medir la velocidad del fluido.



Con el inyector abierto, se pudo medir que la velocidad del aire dentro del tubo era de 2 m/seg, entonces:

$$Q_{\text{Real}} = A \times \text{Vel} = \frac{\pi \times 0,051^2}{4} \text{ m}^2 \times 2 \frac{\text{m}}{\text{seg}} = 0,004085 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

$$G_{\text{Real Aire}} = 0,004085 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \times 1,205 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 0,00492 \frac{\text{Kg}}{\text{seg}} = 4,92 \frac{\text{gr}}{\text{seg}}$$

Obtenido este valor, para conocer el coeficiente de descarga, el siguiente paso es calcular el caudal másico ideal. Considerando al inyector como una tobera, y utilizando los siguientes datos:

- Fluido: Aire.
- Densidad del aire a CNPT: $\rho_{\text{CNPT}} = 1,205 \text{ Kg/m}^3$.
- Coeficiente politrópico: $\gamma = 1,4$.
- Calor específico a presión constante: $C_p = 1006 \text{ J/kgK}$.
- Constante particular del aire: $R_{\text{Aire}} = 287 \text{ J/KgK}$.
- Presión de entrada: $P_e = 4 \text{ bar}$.
- Temperatura de entrada: $T_e = 20^\circ\text{C} (293 \text{ K})$.
- Densidad de entrada: $\rho_e = P_e \times \rho_{\text{CNPT}} = 4,92 \text{ kg/m}^3$.
- Presión de salida: $P_s = 1 \text{ bar}$.
- Diámetro de salida del inyector: $D_s = 5\text{mm}$.
- Área mínima = Área de salida: $A_s = 19,63 \text{ mm}^2$.
- Relación de presión crítica para el aire:

$$\frac{P^*}{P_e} = \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 0,5282$$

Concluimos entonces que tendremos flujo crítico en el área de salida del inyector ya que la relación:



$$\frac{P_s}{P_e} = 0,25 < 0,5282$$

Por lo tanto el número Mach en la salida, donde el área es mínima, será $M_s = 1$. Luego, con ayuda de las siguientes fórmulas para flujo compresible, es posible obtener el caudal másico teórico del inyector utilizando aire:

$$\frac{T_s}{T_e} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} \times M_s^2} \rightarrow T_s = 244,17 \text{ K}$$

$$\frac{\rho_s}{\rho_e} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} \times M_s^2 \right]^{\frac{1}{1 - \gamma}} \rightarrow \rho_s = 3,055 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_s = \sqrt{\gamma \times R_{\text{Aire}} \times T_s} = 313,22 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

$$Q_s = A_s \times c_s = 0,00615 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

$$G_{\text{ideal Aire}} = Q_s \times \rho_s = 0,0188 \frac{\text{Kg}}{\text{seg}}$$

El coeficiente de descarga "Cd" del inyector de GNC es entonces:

$$C_d = \frac{G_{\text{ideal Aire}}}{G_{\text{Real Aire}}} = 0,262$$

Resta hacer los mismos cálculos para flujo compresible utilizando hidrógeno:

- Densidad del hidrógeno a CNPT: $\rho_{\text{CNPT}} = 0,0899 \text{ Kg/m}^3$.
- Coeficiente politrópico del hidrógeno: $\gamma = 1,4094$.
- Calor específico a presión constante: $C_p = 14300 \text{ J/kgK}$.
- Constante particular del hidrógeno: $R_{H_2} = 4124,21 \text{ J/KgK}$.
- Presión de entrada: $P_e = 4 \text{ bar}$.
- Temperatura de entrada: $T_e = 20^\circ\text{C} (293 \text{ K})$.
- Densidad de entrada: $\rho_e = P_e \times \rho_{\text{CNPT}} = 0,3596 \text{ kg/m}^3$.
- Presión de salida: $P_s = 1 \text{ bar}$.
- Diámetro de salida del inyector: $D_s = 5 \text{ mm}$.
- Área mínima = Área de salida: $A_s = 19,63 \text{ mm}^2$.
- Relación de presión crítica para el hidrógeno:

$$\frac{P^*}{P_e} = \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 0,5267$$

Concluimos entonces que tendremos flujo crítico en el área de salida del inyector ya que la relación:

$$\frac{P_s}{P_e} = 0,25 < 0,5267$$

Por lo tanto el número Mach en la salida, donde el área es mínima, será $M_s = 1$. Luego, con ayuda de las siguientes fórmulas para flujo compresible, se puede obtener el caudal másico teórico del inyector utilizando hidrógeno:

$$\frac{T_s}{T_e} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} \times M_s^2} \rightarrow T_s = 243,21 \text{ K}$$

$$\frac{\rho_s}{\rho_e} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} \times M_s^2 \right]^{\frac{1}{1 - \gamma}} \rightarrow \rho_s = 0,228 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_s = \sqrt{\gamma \times R_{H_2} \times T_s} = 1189 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

$$Q_s = A_s \times c_s = 0,02334 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

$$G_{\text{ideal H}_2} = Q_s \times \rho_s = 0,00532 \frac{\text{Kg}}{\text{seg}}$$

$$G_{\text{Real H}_2} = C_d \times G_{\text{ideal H}_2} = 0,001395 \frac{\text{Kg}}{\text{seg}} = 1,395 \frac{\text{gr}}{\text{seg}}$$

Esta es una aproximación del caudal másico real del inyector de GNC estando completamente abierto. Igualmente lo podemos aproximar como caudal másico real instantáneo sabiendo que estamos arrastrando el error de no considerar los lapsos de apertura y cierre del inyector.

Luego se calcula el número de inyectores de GNC necesarios para el correcto funcionamiento del motor "Niny GNC":

$$N_{\text{iny GNC}} = \frac{G_{\text{inst H}_2}}{G_{\text{Real H}_2}} = 2, \frac{39}{1}, 395 = 1,713$$

Por lo tanto se concluye que se necesitan 2 inyectores de GNC. Con este número de inyectores se podría llegar al máximo caudal másico requerido por el motor, esto es mezcla estequiométrica a 4000 RPM. En caso de no llegar a inyectar el caudal necesario para alcanzar la mezcla estequiométrica, se aumentara la presión de inyección hasta lograr tal fin.

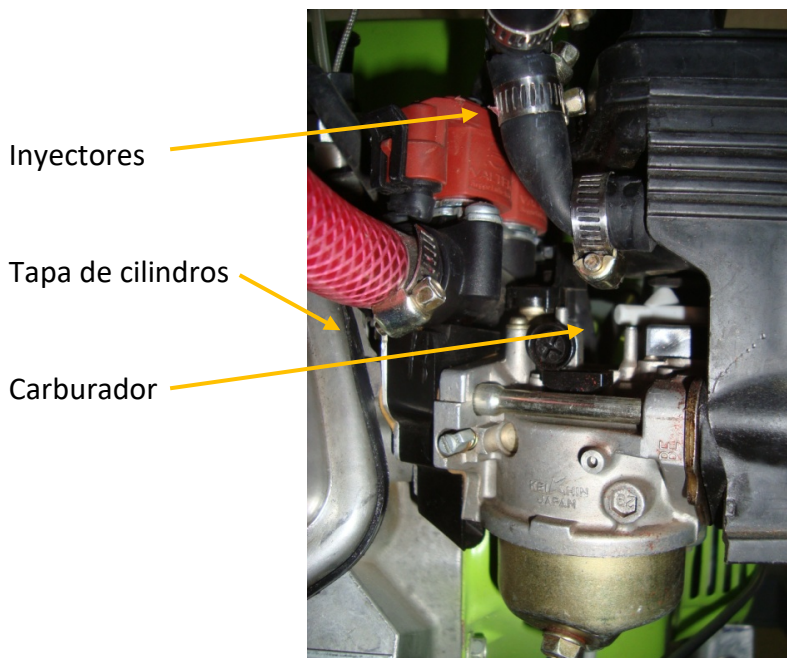
Observando la siguiente relación para el inyector de GNC:

$$\frac{G_{\text{Real aire}}}{G_{\text{Real H2}}} = 4, \frac{92}{1}, 395 = 3,526$$

Podemos decir que el inyector libera, bajo las mismas condiciones a la entrada y a la salida, 3,526 veces más aire que hidrógeno (en masa). Suponiendo que pasaría lo mismo con el inyector de nafta calculamos cuántos necesitaríamos. Recordando que para el inyector de nafta:

$$G_{\text{Real aire}} = 0,1315 \frac{\text{gr}}{\text{seg}} \rightarrow G_{\text{Real H2}} = 0, \frac{1315}{3}, 526 = 0,0373 \frac{\text{gr}}{\text{seg}}$$

$$N_{\text{iny nafta}} = \frac{G_{\text{inst H2}}}{G_{\text{Real H2}}} = 2, \frac{39}{0}, 0373 = 64,07$$



Fotografía de la admisión del motor.



Entonces se concluye que se necesitarían unos 64 inyectores de nafta para abastecer de hidrógeno al motor de 337 cm³.

En la fotografía se muestra cómo quedaron instalados los dos inyectores de GNC sobre la placa de baquelita que se encuentra instalada entre el carburador y el conducto de admisión del MCIA actuando como junta de estanqueidad. De esta manera el gas inyectado recorre el menor camino posible hasta la entrada del motor, como se muestra en la imagen.

Encendido

Originalmente, este motor contaba con un sistema de encendido “por chispa perdida”. Este sistema se caracteriza por generar un salto de chispa cada 360° en cercanías a los dos PMS del ciclo; uno en fin de compresión - principio de expansión y otro en fin de escape - principio de admisión. Está claro que el segundo salto de chispa descrito no cumple función alguna (de ahí el nombre “chispa perdida”) pero, a su vez, no ocasiona ningún tipo de inconvenientes en el funcionamiento del motor original (que utiliza nafta como combustible) y su aplicación se debe su simpleza constructiva de muy bajo costo.

Básicamente el sistema cuenta con un imán fijo al volante del motor que induce una corriente en una bobina fija al block en un momento seguramente correspondiente al avance óptimo en las condiciones de funcionamiento para las cuales fue diseñado el motor.

El sistema original fue modificado entonces primero para evitar contra explosiones en la admisión causadas por la “chispa perdida”, caso que podría ocurrir, por ejemplo, si quedara hidrógeno sin quemar luego de la combustión y segundo para que sea posible realizar pruebas con diferentes grados de avance al encendido, recordar la gran velocidad de llama que caracteriza la combustión del hidrógeno en comparación con la nafta. Además se sabe que dicha velocidad varía según la riqueza de mezcla aire – hidrógeno. Mientras más rica sea la mezcla más velocidad de llama tendrá y, por lo tanto, menos avance al encendido se requerirá para obtener la potencia óptima.

Por dichas razones se implementó un sistema de encendido electrónico independiente que utiliza energía de la red para producir la ignición y es controlado por un microprocesador que permite variar los siguientes parámetros de interés:

- Avance al encendido (en grados respecto al PMS de combustión).
- Tiempo de carga de la bobina (en milisegundos).

Este último se propuso para comparar la energía de ignición requerida para el uso de nafta e hidrógeno como combustibles.

Más adelante se describirá el funcionamiento del microprocesador perteneciente al sistema de control a lazo abierto que diseñó para el funcionamiento del motor con hidrógeno.

Admisión de aire

Para poder realizar una inyección correctamente y lograr mezclas con precisión para distintos estados de carga del motor, es necesario conocer la cantidad de aire que éste admite, para ello se colocó un sensor MAF (mass air flow) de Ford Escort en el tubo de admisión.

Fue necesario para su instalación fabricar una pieza que adaptara los diferentes diámetros de tubos. En la parte superior al haber eliminado el filtro de aire se agregó un tramo de tubo que ayuda a que el MAF reciba el flujo ligeramente desarrollado y se colocó un pequeño filtro de tapa.



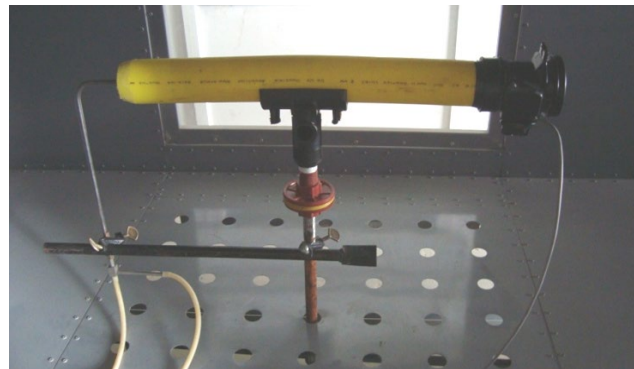
Filtro

M
A
F

Pieza adaptación

Fotografía de la admisión del motor.

Debido a que se desconocían las características del sensor fue necesario ensayarlo en el túnel de viento de la Universidad y contrastarlo con un tubo pitot ya calibrado. En la siguiente imagen se puede observar el sensor MAF a la derecha y el tubo pitot a la izquierda.



Ensayo sensor MAF en túnel de viento de la facultad.

Los datos obtenidos se muestran en el siguiente gráfico junto con la ecuación de ajuste a la cual responde con suficiente aproximación.

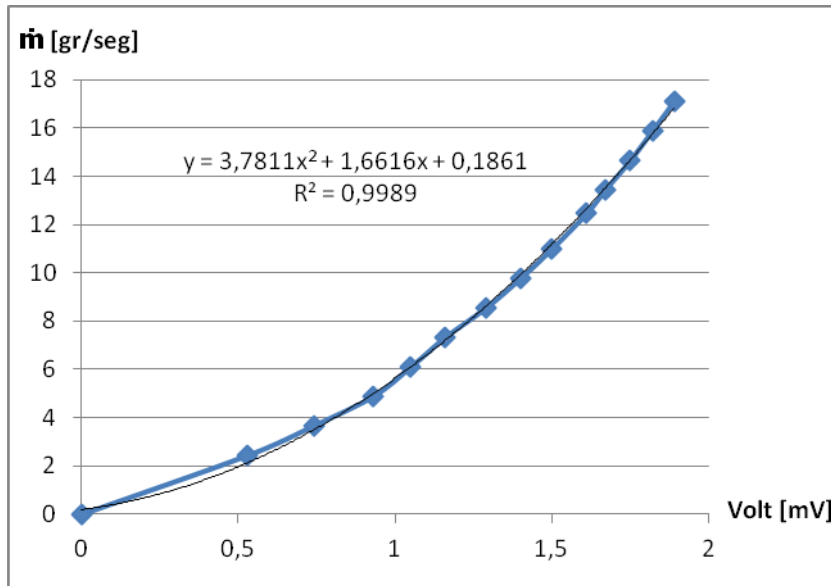
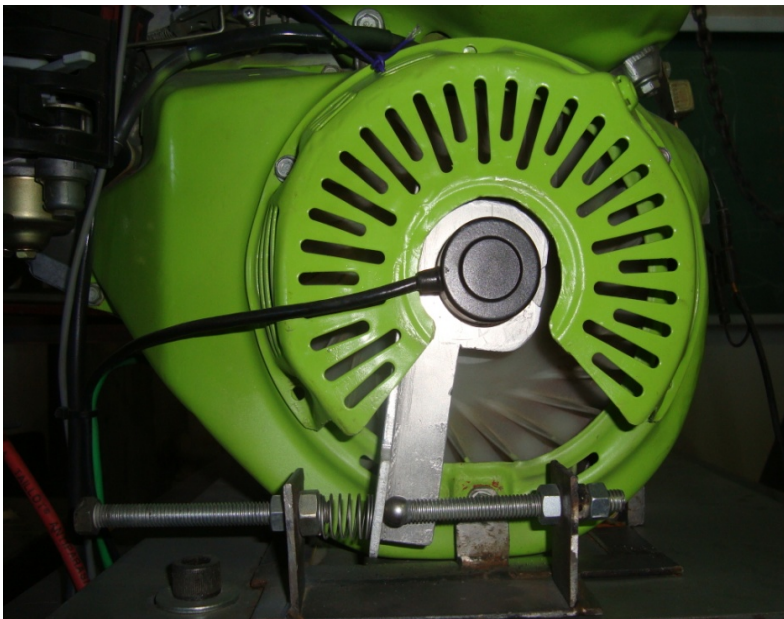


Gráfico de respuesta de sensor MAF. Caudal másico vs. Voltaje de salida.

Sensores de posicionamiento

Para poder referenciar el sistema de ignición y el sistema de inyección, tanto en tiempo como en duración, se colocó en el extremo disponible del MCIA un codificador angular o “encoger” que tiene como señales de salida un pulso por cada revolución y por otro canal 360 pulsos por revolución.

De esta manera el pulso por revolución, sincronizándolo correctamente, dará una referencia del momento en el que el pistón se encuentra en el PMS y por otro lado los 360 pulsos por revolución darán una referencia angular de la posición del cigüeñal.



La imagen muestra el encoder y su sistema de regulación colocado en el extremo libre del cigüeñal

Como se puede ver en la imagen el encoder se encuentra soportado en voladizo por su propio eje y vinculado a través de una palanca de aluminio que tiene en su extremo un sistema de regulación del ángulo del estator del encoder. Este sistema permite ajustar la posición del mismo para sincronizar la señal de salida con el PMS del pistón.

Sensor de proximidad magnético Reed

La función de dicho sensor es complementar al encoder, ya que, como se explicó anteriormente, éste envía una señal por cada revolución en sincronía con el PMS del pistón, pero solo uno de estos puntos es de interés, ya que uno corresponde al inicio del proceso de admisión y el otro al inicio del proceso de explosión. Es por esto que se necesita de otra señal que identifique en cuál de los dos puntos se encuentra el cigüeñal.

Para ello se recurre a un sensor de proximidad magnético, el cual dará una señal de salida en el momento en que un campo magnético se aproxime a él. Colocando un imán en el árbol de levas, quien da una revolución por cada dos revoluciones del motor, se obtiene una señal cada dos señales del encoder. De esta manera es posible diferenciar la compresión de la admisión y realizar la secuencia de inyección/ignición de manera correcta.

En las imágenes se muestra en primer lugar los engranajes del cigüeñal y del árbol de levas con un punto rojo en la posición donde se colocó el imán, el cual se sitúa justo en el cruce de levas. Luego se puede observar el sensor desde el exterior y en la siguiente imagen visto desde el interior. Finalmente se muestra el árbol de levas con el imán previamente a la realización de un orificio y embutido del mismo.



Engranajes de distribución.



Sensor vista exterior.



Sensor vista interior.



Árbol de levas.

Sensor sonda Lambda

Con el fin de medir la riqueza de la mezcla y, principalmente, tener noción de cuando se está trabajando con mezclas ricas sobre el motor, e incluso expulsando hidrógeno puro por el conducto de escape, se colocó un sensor sonda lambda en la salida del mismo.

Este sensor tiene una señal de salida de 100mV a 400mV para mezclas pobres y una señal de 400mV a 900mV para mezclas ricas. Su temperatura de funcionamiento es de 315°C en adelante.



Conducto de escape con sonda lambda.

Sensor temperatura de escape

En la salida de escape del motor se colocó un termocupla para poder conocer la temperatura de los gases que salen del mismo. Esto ayuda a evitar el calentamiento del motor y da un indicio de cómo está quemando la mezcla en su interior y que tan correcto es el adelanto de la chispa, ya que de estar muy “atrasado” la temperatura de los gases del motor aumenta.



Termocupla colocada en el silenciador del escape.

Para conocer cómo trabaja la termocupla se realizó un ensayo de la misma en el cual se lo sometió a diferentes temperaturas y con la ayuda de un termómetro calibrado se registró cual era el voltaje de salida para cada temperatura. Los valores obtenidos se muestran en el siguiente gráfico junto con la ecuación a la cual responde el comportamiento de este sensor.

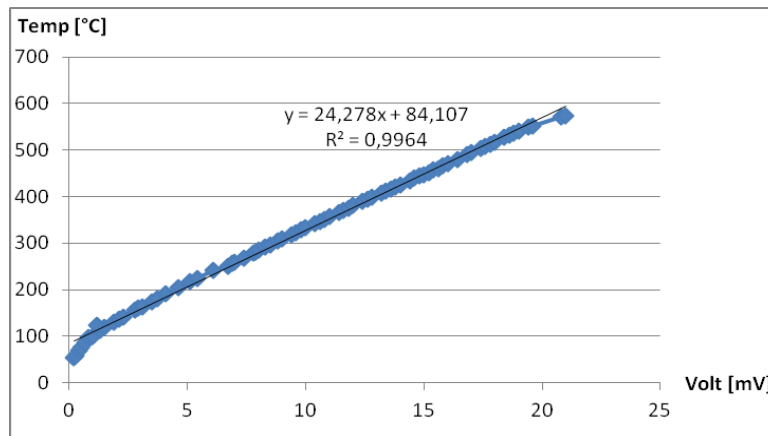
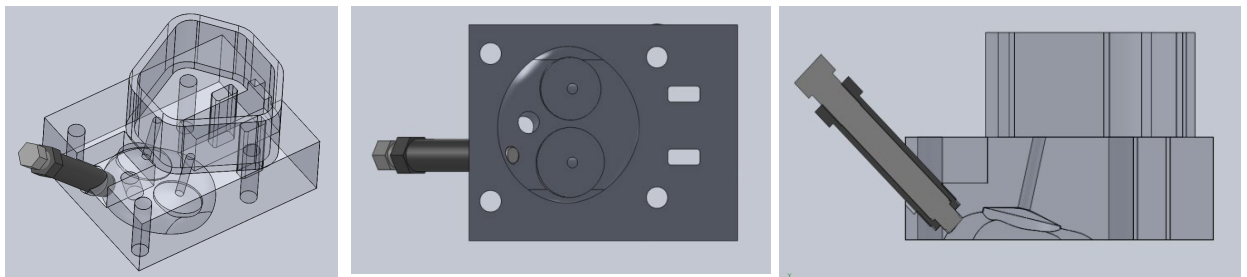


Gráfico de respuesta de la termocupla. Temperatura Vs. Voltaje de salida

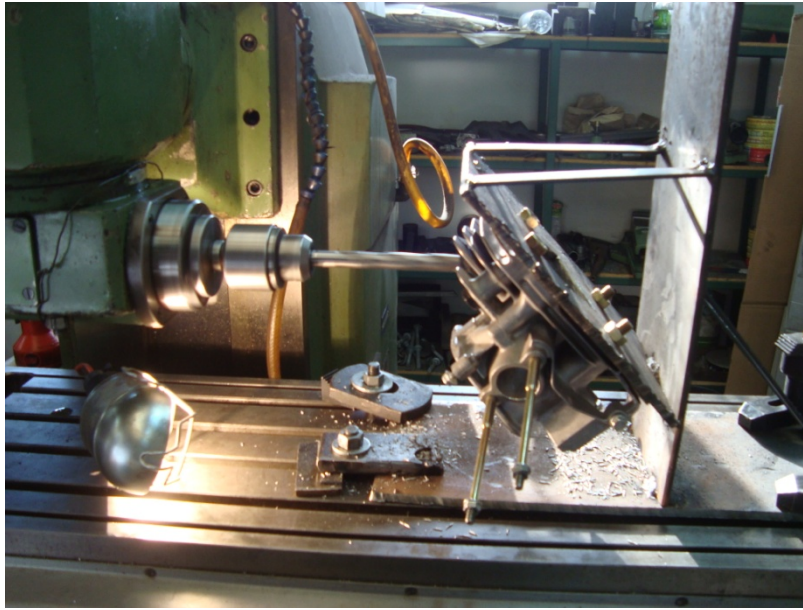
Sensor de presión

Con el fin de poder medir el ciclo de trabajo del motor de combustión interna y aprovechando la existencia de un sensor de presión, capaz de medir dentro de una cámara de combustión, se realizó un orificio en la tapa de cilindros del motor para poder montar dicho sensor.

Debido al escaso espacio disponible en la tapa de cilindros, se procedió a relevar la misma y realizar un modelo 3D simplificado que nos permitiera analizar los posibles lugares. Finalmente se decidió colocar el sensor donde muestra la siguiente figura.



Para llevarlo a cabo el mecanizado, se realizó un soporte en el cual montar la tapa de cilindro, se le practicó un orificio utilizando una fresadora y finalmente se lo rosco con un macho adecuado.



Operación de taladrado en la tapa de cilindros realizado en los talleres de la facultad.

Venteos

Debido a que por los aros del pistón siempre existen fugas, por más pequeñas que sean, es necesario ventear el cárter del motor, ya que se trata de una mezcla explosiva con alto rango de inflamabilidad y baja energía de ignición.

El motor originalmente contaba con un venteo en la tapa de válvulas pero debido a su forma fue necesario agregar un segundo venteo para mayor seguridad.

Es por esto que se agregó un venteo en la parte superior del mismo con el fin de poder vaciarlo completamente, para ello se aprovechó un orificio en la parte superior correspondiente a un dispositivo que gobierna el acelerador y mantiene el régimen de giro constante independientemente de las variaciones de carga, función que debe cumplir este motor en su versión original pero no será de utilidad en la aplicación de interés.

En la segunda imagen se pueden apreciar ambos venteos, por la parte inferior los gases salen de la tapa de válvulas (venteo original) y por la parte superior los gases

proviene de la parte alta del cárter (venteo fabricado), ambos se juntan en una unión T e ingresan al conducto de admisión.

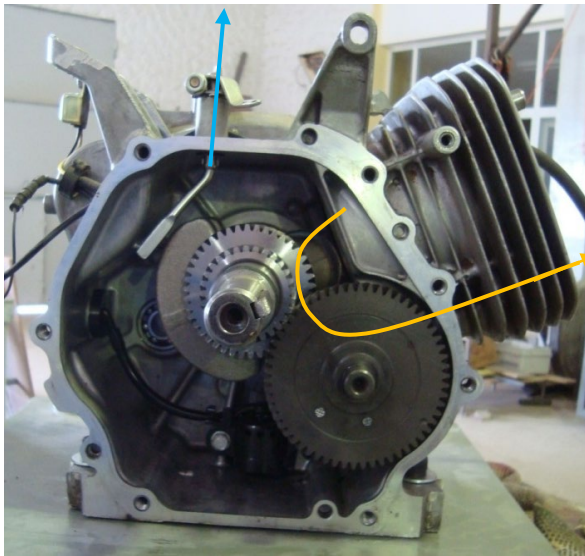


Fig n°xx: Recorrido de gases dentro del motor.

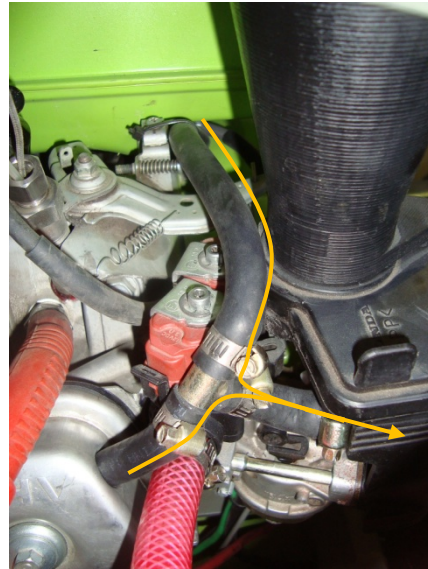


Fig n°xx: Conexión de venteos.

Secuencia de inyección y encendido

A continuación se analizarán los requerimientos en cuanto a la secuencia de inyección del MCI para funcionar con hidrógeno como combustible, luego se describirá el sistema de inyección e ignición electrónica. Cabe aclarar que los ensayos realizados en el presente proyecto son específicos para un punto de funcionamiento del motor, esto es, RPM, posición de mariposa, carga.

Retardo a la inyección

Como se aclaró anteriormente una de las propiedades combustibles del hidrógeno es la baja energía de ignición. Esta propiedad se convierte en un problema a la hora de inyectar el gas en un MCI; los gases de escape provenientes del ciclo anterior, presentes en la cámara de combustión en el momento de la admisión, pueden tener energía suficiente para encender una mezcla aire-hidrógeno, lo que terminaría en un retroceso de llama por el tubo de admisión o contra explosión. Lo mismo puede ocurrir con algún punto caliente del motor en el momento de la admisión, por ejemplo la válvula de escape o la bujía. Con el fin de evitar este fenómeno se pensó en una secuencia de inyección que permita refrigerar con aire los gases residuales de la cámara de combustión antes de que el hidrógeno ingrese al motor. Podemos definir entonces el retardo a la inyección "Ri" como la cantidad de grados que gira el cigüeñal

desde el punto muerto superior de admisión (PMSa) hasta el comienzo de la inyección de hidrógeno. El siguiente esquema da una idea gráfica de la secuencia de inyección.

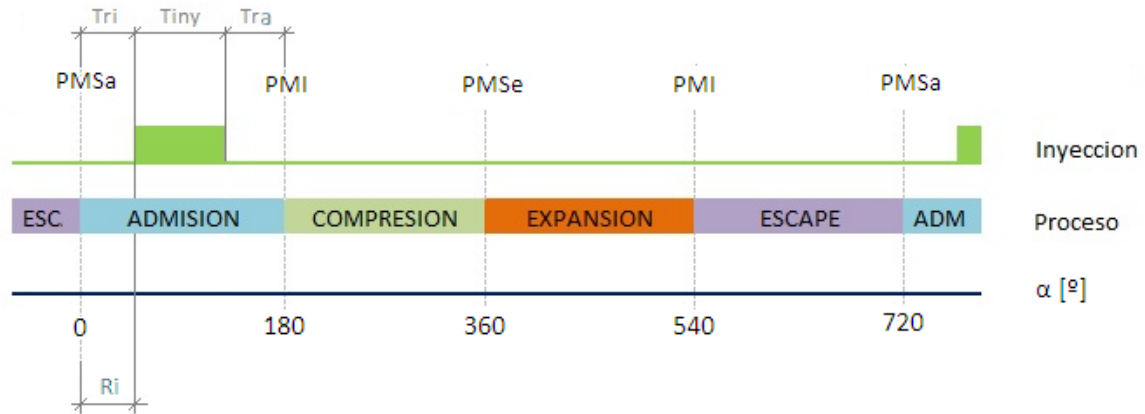


Figura 1

Donde:

- R_i = Retardo a la inyección.
- T_{ri} = Tiempo de retardo a la inyección.
- T_{iny} = Tiempo de inyección.
- T_{ra} = Tiempo restante de admisión.
- α [°] = Desplazamiento angular del cigüeñal en grados.

Tiempo de inyección

El tiempo de inyección de hidrógeno requerido se obtiene en función de las siguientes variables:

- RPM del motor.
- Riqueza de mezcla "RM".

Se define riqueza de mezcla como el cociente entre la relación de mezcla estequiométrica y una relación de mezcla determinada en masa.

Se consideran los siguientes parámetros ideales:

- Llenado del cilindro del 100% (no se tienen en cuenta los gases residuales de combustión).
- $AAA = RCA = AAE = RCE = 0^\circ$ (no se tiene en cuenta el reglaje del MCIA).

La presión en el colector de admisión "P_{adm}" se estima según la posición de la mariposa y las revoluciones del motor, esta presión se ha medido en varios ensayos



experimentales realizados en MCI A de similares características, por lo que se tiene experiencia en ello.

Cálculo del tiempo de admisión:

$$t_{adm} = 0,5 \text{ rev} \times \frac{1}{\text{rpm}} \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}}$$

Conociendo la cilindrada del motor "VCil", el caudal volumétrico instantáneo de aire será:

$$Q_{IAire} = \frac{V_{Cil}}{t_{adm}} \times \frac{\%Vol_{Aire} \text{ cm}^3}{100 \text{ seg}}$$

Donde "% Vol Aire" es el porcentaje de aire a admitir para la riqueza de mezcla "RM" requerida:

$$\%Vol_{Aire} = 100 \times \left[1 - \frac{1}{\left(2,38 + 1 \right)} \right]$$

El número 2,38 corresponde a la relación aire combustible en volumen para la mezcla estequiométrica.

El caudal másico instantáneo de aire será:

$$G_{IAire} = Q_{IAire} \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \times \rho_{Aire \text{ adm}} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Donde " $\rho_{Aire \text{ adm}}$ " es la densidad del aire correspondiente a la presión de admisión estimada.

Multiplicando este caudal por el tiempo de admisión se halla la masa de aire admitida " m_A " por ciclo:

$$m_A = G_{IAire} \times t_{adm}$$

Luego, la masa de hidrógeno a inyectar por ciclo será:

$$m_{H2} = m_A \times \frac{M_{H2}}{M_A}$$

Donde " M_{H2}/M_A " es la relación de masas combustible – aire para la riqueza de mezcla "RM" requerida.



Veamos el formato de la planilla de cálculo:

rpm =		rpm
Riqueza =		0,1<RM<7,14
P adm =		bar
paire adm=		kg/m3
ρH2 adm=		kg/m3
t adm =		seg
Vcil =		cm3
%Vol H2 =		%
%Vol Aire =		%
Ma/MH2 =		
Qi aire =		cm3/seg
Gi aire =		kg/seg
m aire =		gr X ciclo
m H2 =		gr X ciclo

Tabla 1

Luego, conociendo el caudal másico que maneja cada inyector, se realizó otra tabla donde se puede calcular el tiempo de inyección “ T_{iny} ” correspondiente a la masa de hidrógeno “ m_{H2} ” que se compute. Recordemos que se pueden utilizar uno ó dos inyectores según las condiciones de funcionamiento.

$$G_{Real H2} = 0,001395 \frac{Kg}{seg} = 1,395 \frac{gr}{seg}$$

$$m_{H2} = N_{iny} \times G_{Real H2} \times T_{iny} \quad \rightarrow \quad T_{iny} = \frac{m_{H2}}{N_{iny} \times G_{Real H2}}$$

Gr =		gr/seg
N iny =		(1 ó 2)
m H2 =		gr X ciclo
Tiny =		seg

Tabla 2

Tiempo restante de admisión

Como se puede apreciar en la figura 1 la secuencia de admisión ideal sería admitir aire un cierto porcentaje de la carrera, luego toda la masa de hidrógeno requerida para la condición de funcionamiento deseada y, el resto de la carrera, admitir aire nuevamente hasta que finalice el proceso de admisión. Esta última admisión de aire en



el tramo final de la carrera tiene como fin asegurar que todo el hidrógeno que se inyectó ingrese al cilindro.

Otro ítem importante a tener en cuenta en la inyección de hidrógeno es el gran volumen que ocupa al ser liberado en el tubo de admisión. Bajo ciertas condiciones de funcionamiento (rpm, carga, retardo a la inyección, posición de la mariposa) puede ocurrir que el volumen que se esté inyectando sea mayor al volumen que va generando el pistón en su descenso. En este caso podría fugarse el gas por la admisión y/o quedar un cierto porcentaje del hidrógeno inyectado en el tubo de admisión que provocaría una contra explosión en el siguiente ciclo. Para evitar este problema se comparó la velocidad instantánea del aire " V_A " con la "velocidad de fuga de hidrógeno" " V_{H_2} ". Llamamos "velocidad de fuga de hidrógeno" a la velocidad con que se fugaría el hidrógeno inyectado si estuviera cerrada la válvula de admisión. Siempre se buscará que la velocidad del aire sea mayor que la velocidad de fuga de hidrógeno en el momento de la inyección. En estos planteos se supone que no hay mezcla y que la interfase entre aire e hidrógeno es "hermética". Si bien esto no es cierto, permite realizar una estimación razonable de los parámetros fundamentales del proceso.

Conociendo la sección del colector de admisión " S " y el caudal másico de hidrógeno " G_{H_2} " se puede calcular la velocidad " V_{H_2} " de la siguiente manera:

$$G_{H_2} = \rho_{H_2 \text{ adm}} \times V_{H_2} \times S \quad \rightarrow \quad V_{H_2} = \frac{G_{H_2}}{\rho_{H_2 \text{ adm}} \times S}$$

Donde " $\rho_{H_2 \text{ adm}}$ " es la densidad del hidrógeno correspondiente a la presión de admisión estimada.

Por otro lado se debe analizar el movimiento del pistón dentro del cilindro ya que de eso dependerá la velocidad del aire instantánea en la admisión. Como es sabido, el pistón tiene un movimiento alterno rectilíneo. La transformación de éste en movimiento circular se logra a través del sistema biela-manivela. A continuación se describe el análisis de este sistema para un motor centrado.

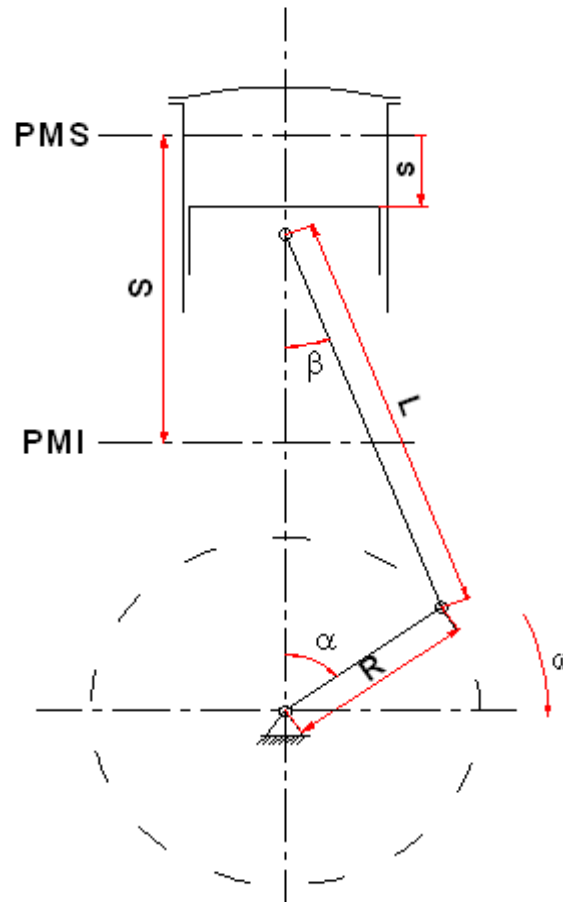


Figura 2

$$s = R + L - (R \times \cos\alpha + L \times \cos\beta) \quad \rightarrow \quad s = R \left[1 + \frac{L}{R} - \left(\cos\alpha + \frac{L}{R} \times \cos\beta \right) \right]$$

$$s = R \left[1 + \frac{1}{\lambda} - \left(\cos\alpha + \frac{1}{\lambda} \times \cos\beta \right) \right] \quad \rightarrow \quad \cos\beta = \sqrt{1 - \lambda^2 \times \text{sen}^2\alpha}$$

$$s = R \left[1 + \frac{1}{\lambda} - \left(\cos\alpha + \frac{1}{\lambda} \times \sqrt{1 - \lambda^2 \times \text{sen}^2\alpha} \right) \right]$$

Esta es la expresión del desplazamiento del pistón en función del desplazamiento angular del cigüeñal “ α ”, donde:



- Largo de manivela: $R = 3,2$ cm.
- Largo de biela: $L = 11,15$ cm.
- Relación biela-manivela: $\lambda = R/L = 0,287$.

Multiplicando la expresión anterior por el área del pistón “ A_P ” obtenemos el volumen “ V_P ” que genera el pistón en su descenso en función del desplazamiento angular del cigüeñal.

$$V_P = A_P \times R \left[1 + \frac{1}{\lambda} - \left(\cos\alpha + \frac{1}{\lambda} \times \sqrt{1 - \lambda^2 \times \text{sen}^2\alpha} \right) \right]$$

Esta ecuación se plasmó en la siguiente tabla:

t adm =		mseg
Ri =		º
Tri =		mseg
Tiny =		mseg
Tra =		mseg
VPcorrido =		cm3

Tabla 3

Donde “ $V_{P \text{ Corrido}}$ ” es el volumen que generó el pistón en su descenso desde el PMSa hasta el comienzo de la inyección. Y recordamos:

Ri = Retardo a la inyección.

Tri = Tiempo de retardo a la inyección.

Tiny = Tiempo de inyección.

Tra = Tiempo restante de admisión.

El desplazamiento angular “ α ” se puede expresar en función del tiempo “ t ” y las revoluciones “rpm” del motor como sigue:

$$\alpha = \text{rpm} \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{360^\circ}{1 \text{ rev}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \times t \text{ seg}$$

Luego, con el tiempo “ t ” contando desde el comienzo de la inyección, se realizó una tabla con el siguiente formato:



tiny [mseg]	mH2 [mgr]	α [°]	VP [cm3]	VA [m/seg]	VC [m/seg]
----------------	-----------	--------------	----------	------------	------------

Tabla 4

Donde “V_A” es la velocidad del aire en la sección del tubo de admisión y es calculada como sigue:

$$V_A = \frac{\Delta V_P}{S \times \Delta t_{\text{tiny}}}$$

Recordemos que “S” es la sección del tubo de admisión.
Definimos ahora velocidad de control “V_c” como:

$$V_C = V_A - V_{H2}$$

Con las tablas 1, 2, 3 y 4 en una misma planilla de cálculo, una vez determinadas las condiciones de funcionamiento para el ensayo que se quiera realizar, esto es RPM, posición de mariposa y riqueza de mezcla, se puede ir ajustando el valor de retardo a la inyección “Ri” y el uso de uno o dos inyectores hasta encontrar que la velocidad de control sea la mayor posible en el momento de la inyección.

Avance al encendido

Tal como se mencionó anteriormente, se pensó en conformar un sistema de encendido electrónico independiente que permita modificar el avance al encendido según se prefiera. Definimos avance al encendido “Ae” como la cantidad de grados que gira el cigüeñal desde el salto de la chispa hasta el PMSe.

SISTEMA DE INYECCIÓN Y ENCENDIDO ELECTRONICO

El motor cuenta con un sistema electrónico de inyección e ignición a lazo abierto. Un microprocesador recibe información de dos sensores: un encoder y un sensor reed. El encoder, montado en el cigüeñal, es un transductor rotativo que brinda dos señales digitales, una de ellas acusa un pulso por revolución (señal 1X) mientras que la otra acusa 360 (señal 360X) o sea un pulso equivale a un grado de giro. La señal 1X está referenciada al punto muerto superior (PMS). Debido a que el MCI es de cuatro tiempos realizando un ciclo cada dos vueltas del cigüeñal en donde un PMS corresponde al final de escape – principio de admisión (PMSa) y el otro al final de compresión – principio de expansión (PMSe). Ésta es la razón por la cual no se podría controlar la inyección y el encendido del motor sólo con la utilización del encoder, pues éste no tiene manera de diferenciar los PMS. La referencia es brindada por el

sensor reed. Funciona como un interruptor normal abierto que se cierra cuando capta la presencia de un campo magnético. Con ayuda de un pequeño imán de neodimio, montado en el engranaje del árbol de levas, este sensor emite una señal cada dos revoluciones del cigüeñal. Como referencia, para la colocación del imán, se tomó el PMSa.

El siguiente diagrama muestra las señales, provenientes del MCIA, que recibe el microprocesador.

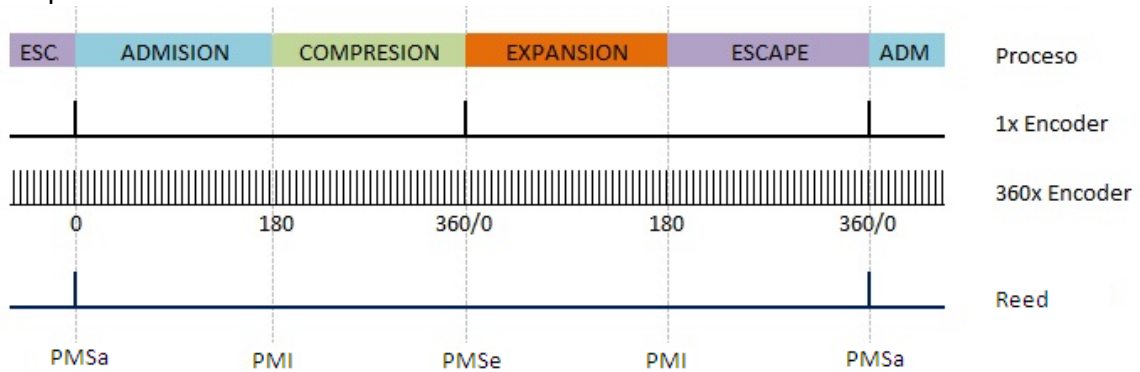


Figura 3

El sistema electrónico permite computar los siguientes valores para el funcionamiento del motor:

- Retardo a la inyección " R_i " en grados de giro del cigüeñal.
- Tiempo de inyección " T_{iny} " en milisegundos.
- Avance al encendido " A_e " en grados de giro del cigüeñal.

Incluso cualquiera de estos parámetros se pueden modificar, de manera independiente, con el motor en funcionamiento. Esto es de gran valor y resulta muy interesante a la hora de realizar ensayos y sacar conclusiones.

Veamos ahora un esquema de funcionamiento del motor con las señales de entrada y de salida del microprocesador:

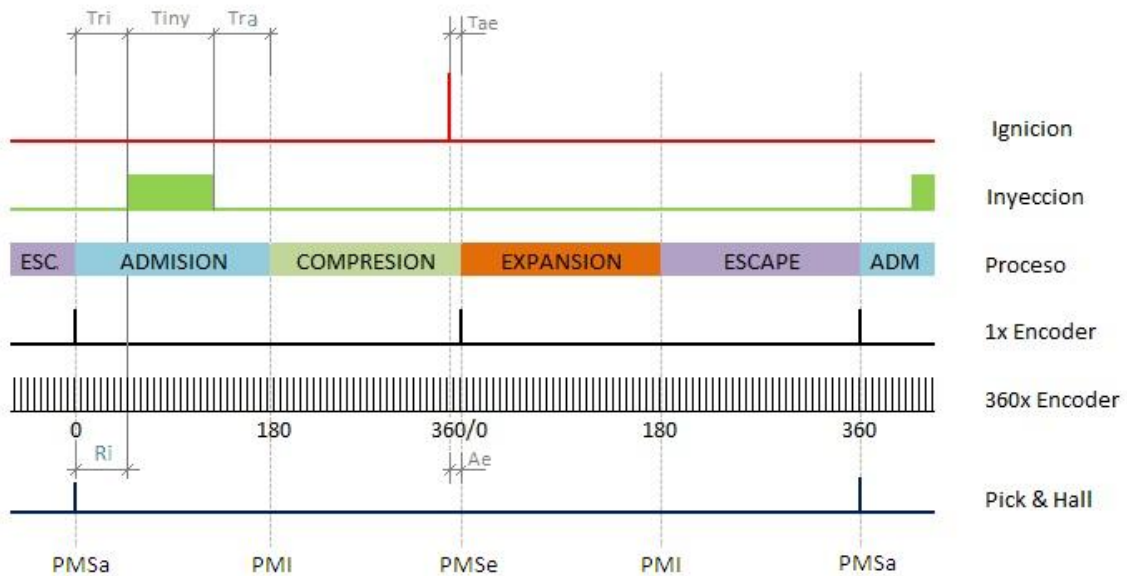


Figura 4

5.3 Banco dinamométrico

El banco dinamométrico es el encargado de medir la potencia entregada por un motor en todo su rango de funcionamiento, es decir, a distintos regímenes de velocidad y diferentes estados de carga, para ello se debe disponer de ciertos elementos básicos, los cuales se detallan a continuación.

- Base o estructura principal donde se montarán todos los elementos auxiliares.
- Bancada y soportes para montar el motor a la misma, así como regular su altura y alineación con el freno.
- Freno dinamométrico capaz de absorber la potencia generada por el MCI ofreciendo un par resistente y elementos para disipar dicha potencia.
- Transmisión de potencia que permita la conexión freno-motor con una cierta elasticidad y capacidad de absorber desalineaciones.
- Motor de arranque encargado de llevar a todo el conjunto a la velocidad de trabajo.
- Dispositivos de medición de las diferentes variables como el par motor y velocidad de giro principalmente.



Tipos de frenos dinamométricos

Como se acaba de mencionar anteriormente un freno dinamométrico es quien se encarga de generar el par resistente que le proporciona la carga al motor, esta, ha de ser variable y capaz de ser aplicada a diversas velocidades de operación. Para lograr esto se han desarrollado varios frenos basados en diferentes principios físicos, ellos son:

- Frenos de fricción.
- Frenos hidráulicos.
- Frenos eléctricos:
 - De corriente continua.
 - De corriente alterna.
 - De corrientes parasitas.

Debido a que en la Universidad ya se disponía de un generador de corriente alterna trifásica con excitatriz independiente, se escogió este como freno del banco dinamométrico.

Frenos eléctricos

Consiste principalmente en un generador eléctrico que transforma la energía mecánica entregada por el motor en energía eléctrica que posteriormente será disipada en resistencias eléctricas. Al disponer de un generador con excitatriz independiente, la variación de carga puede lograrse variando la excitación del mismo modificando su voltaje de alimentación mediante un reóstato conectado en serie.

La potencia eléctrica puede ser obtenida midiendo los parámetros principales de salida del generador con un simple voltímetro y un amperímetro. De todas maneras debe tenerse en cuenta, que existirán pérdidas por rozamiento, por efecto del aire y pérdidas eléctricas dependientes de la carga en el generador por lo que la medida no es del todo precisa. Esto hace que sea mucho más común medir la potencia del motor indirectamente a través del par motor.

Para lograr esto el estator está sujeto a una base basculante y ésta se encuentra unida a una base fija mediante un dispositivo capaz de medida fuerza. De esta manera, el rotor que se encuentra acoplado al MCI, transmite el par al estator por medio del campo magnético, y este al estar solidario a la base basculante, tenderá a girar



respecto a su eje de giro en el mismo sentido que el rotor. Debido a que se encuentra unido a la base fija a través de un punto de apoyo (dispositivo para medir fuerza) se generará un par resultante que dará lugar a la aparición de una fuerza en dicho punto. De esta manera midiendo la fuerza generada y conociendo su brazo de palanca es posible medir el momento torsor neto entregado por el motor.

Finalmente la potencia efectiva entregada por el motor será:

$$Ne: \text{Par motor} \times \text{velocidad angular}$$

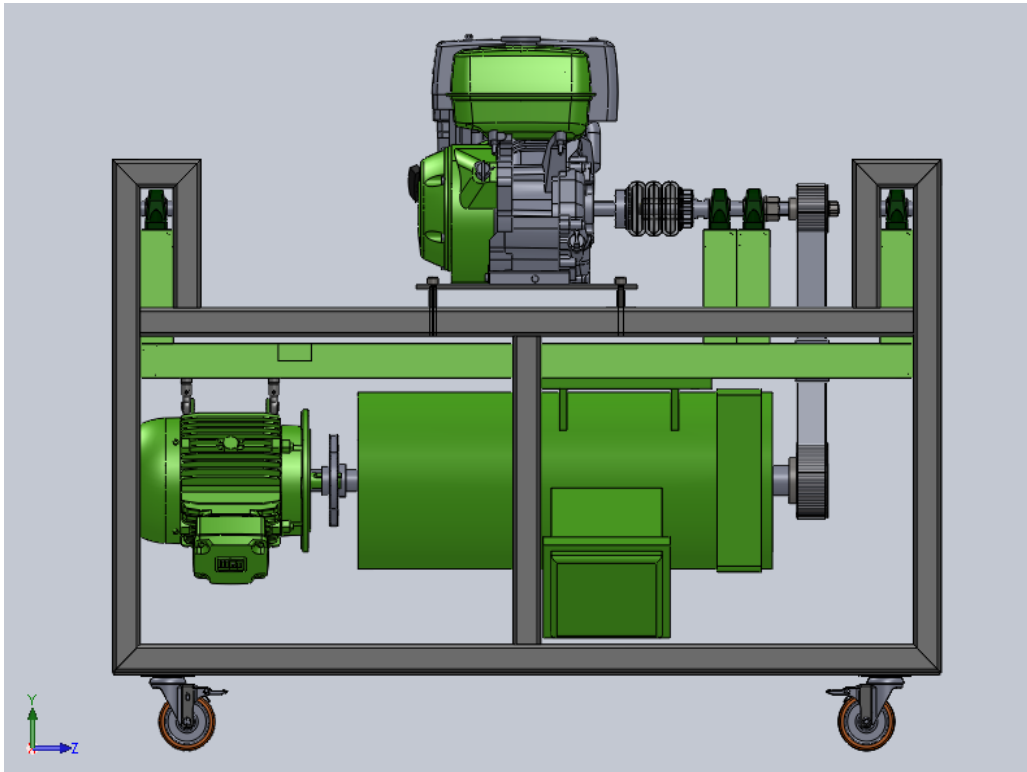
Configuración del banco dinamométrico.

Luego de definir cuáles son las partes principales de un banco dinamométrico se procedió a realizar varias configuraciones posibles, de todas se eligió la que se muestra en la siguiente figura debido principalmente a que todos los elementos se encuentran ubicados en un espacio reducido.

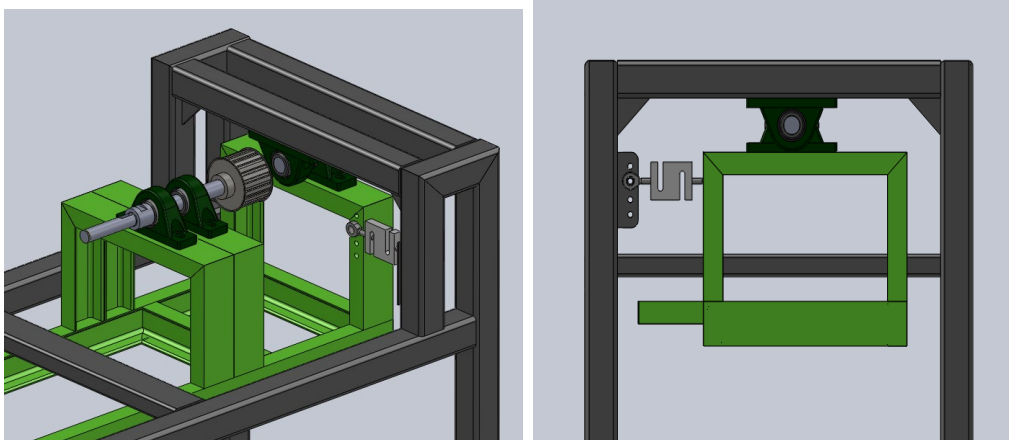
Se puede identificar un estructura principal en color gris y la base basculante en color verde sujeta mediante rodamientos de bolas en sus extremos, esto permite que la base pivotee sobre dichos apoyos permitiendo medir el par antes mencionado.

En la parte superior de la estructura principal se encuentra el MCI sujeto mediante una placa base que permite, a través de unos tornillos, la alineación del mismo con el resto del banco. A su derecha se encuentra el eje auxiliar montado sobre dos rodamientos, y entre ellos un acoplamiento elástico que le da flexibilidad al sistema.

En el otro extremo del eje auxiliar se halla una polea dentada que a través de una correa transmite la potencia al generador que se encuentra en la parte inferior. Tanto éste como el motor de arranque se encuentran solidarios a la base basculante. Estos últimos se encuentran acoplados entre sí por una correa trapezoidal y sus respectivas poleas.



Cabe aclarar que el eje de pivote de la base basculante se encuentra en la misma línea que el eje auxiliar y que el eje del motor, de esta manera cualquier fuerza exterior aplicada sobre el eje, como por ejemplo las que se producen debido a una desalineación, no generan torque ya que son aplicadas sobre este mismo y no poseen brazo de palanca. De esta manera se evitan errores en la medición.



Finalmente como se muestra en la figura la base basculante se encuentra solidaria a la estructura principal mediante una celda de carga, la cual se encarga de medir la fuerza resultante debido al par aplicado por el motor.

Previamente a ser montada la celda fue ensayada en el laboratorio para obtener su constante de rigidez, para ello se la sometió a diferentes pesos calibrados y se registró la tensión de salida con una placa de adquisición de datos. Los datos obtenidos se muestran en el gráfico junto con la ecuación a la cual responde, tanto la lineal como la polinómica de segundo orden que recomienda el INTI para celdas de carga.

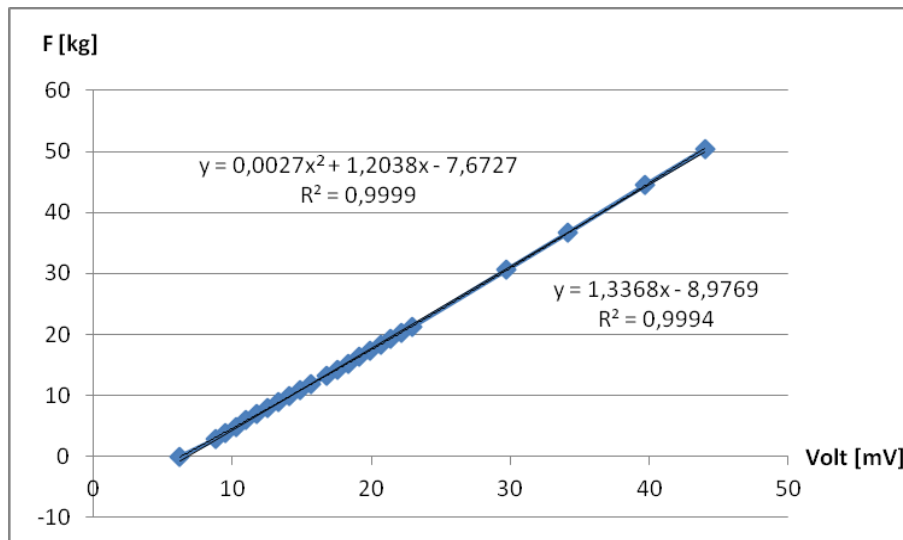


Gráfico respuesta celda de carga. Fuerza vs. Voltaje de salida

Una vez instalada se realizó el mismo trabajo sometiendo a la base basculante a distintos momentos torsores y registrando las tensiones de salida de la celda. Los valores se muestran en el gráfico.

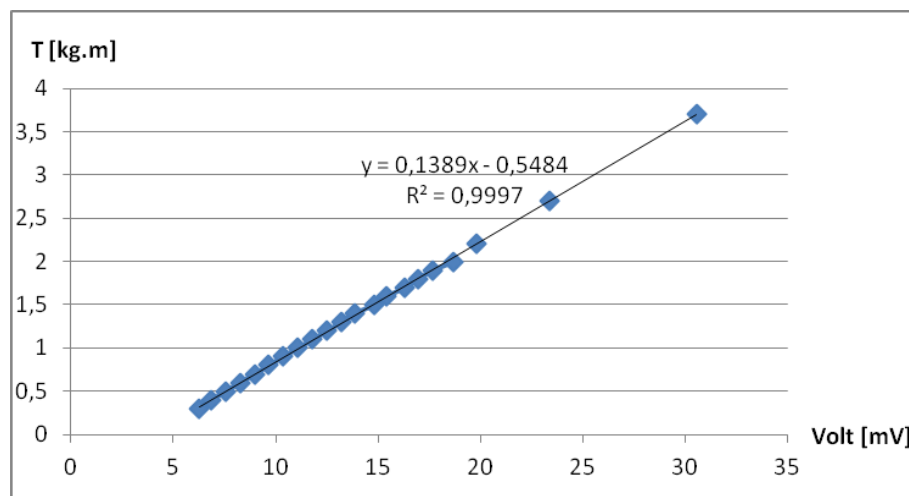


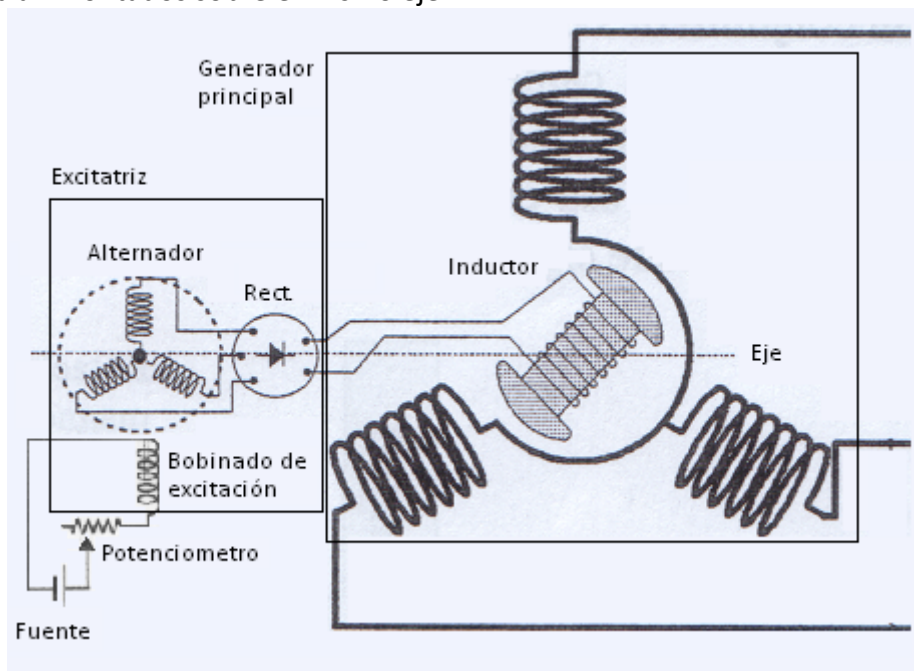
Gráfico respuesta banco dinamométrico. Torque vs. Voltaje de salida.

Generador

Principio de funcionamiento

El generador sincrónico es una máquina eléctrica rotativa capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica. Principalmente está compuesto por una parte móvil ó rotor y una parte fija ó estator, ambas partes poseen bobinados. En el bobinado del rotor circula una corriente continua de excitación que genera un campo magnético constante. Cuando el rotor es impulsado el campo magnético giratorio genera un flujo variable en las bobinas del estator induciendo en ellas una fuerza electromotriz. En este caso el rotor es el inductor mientras que el estator es el inducido, como ocurre en generadores sincrónicos de media y alta potencia.

Se llama circuito de excitación al circuito de corriente continua que produce el campo magnético del inductor. Esta corriente es proporcionada por un generador de baja potencia ó alternador que junto a un rectificador forman lo que llamamos excitatriz. Como se ve en el siguiente esquema el generador principal y la excitatriz se encuentran montados sobre el mismo eje.



Gracias a dicha disposición de los componentes este tipo de generador no necesita escobillas ni anillos rozantes.

El bobinado de excitación es alimentado externamente por una fuente variable de corriente continua de baja potencia.



La fuerza electromotriz inducida “E” en una bobina de “N” espiras sometida a un flujo magnético variable sinusoidal “ ϕ ” de frecuencia “f” está dada por la siguiente expresión:

$$E = 4,44 \times f \times N \times \phi$$

En un generador trifásico de corriente alterna con excitatriz independiente, como el que se dispone utilizar como freno, la frecuencia “f” depende del número de revoluciones “n”, el número de espiras “N” es una constante y la intensidad del flujo magnético “ ϕ ” es directamente proporcional a la corriente continua “i” que circula por la excitatriz. O sea:

$$E = cte \times n \times i$$

La potencia que es capaz de disipar el generador en su rango de funcionamiento no solo depende de la fem inducida en sus bobinas sino también del tipo de carga que tenga. En este caso en particular se contaba con varias resistencias de fundición de 20KW y 0,5 ohm disponibles para utilizar como disipadores de potencia. Existen entonces tres posibilidades de conexión al generador: en estrella, en triángulo o bien utilizar un rectificador de corriente alterna de media onda y conectar resistencias en serie para disipar potencia en corriente continua. La potencia que sería capaz de disipar el generador para cada conexión sería:

Conexión en estrella:

$$P = \frac{3 \times E^2}{R}$$

Conexión en triángulo:

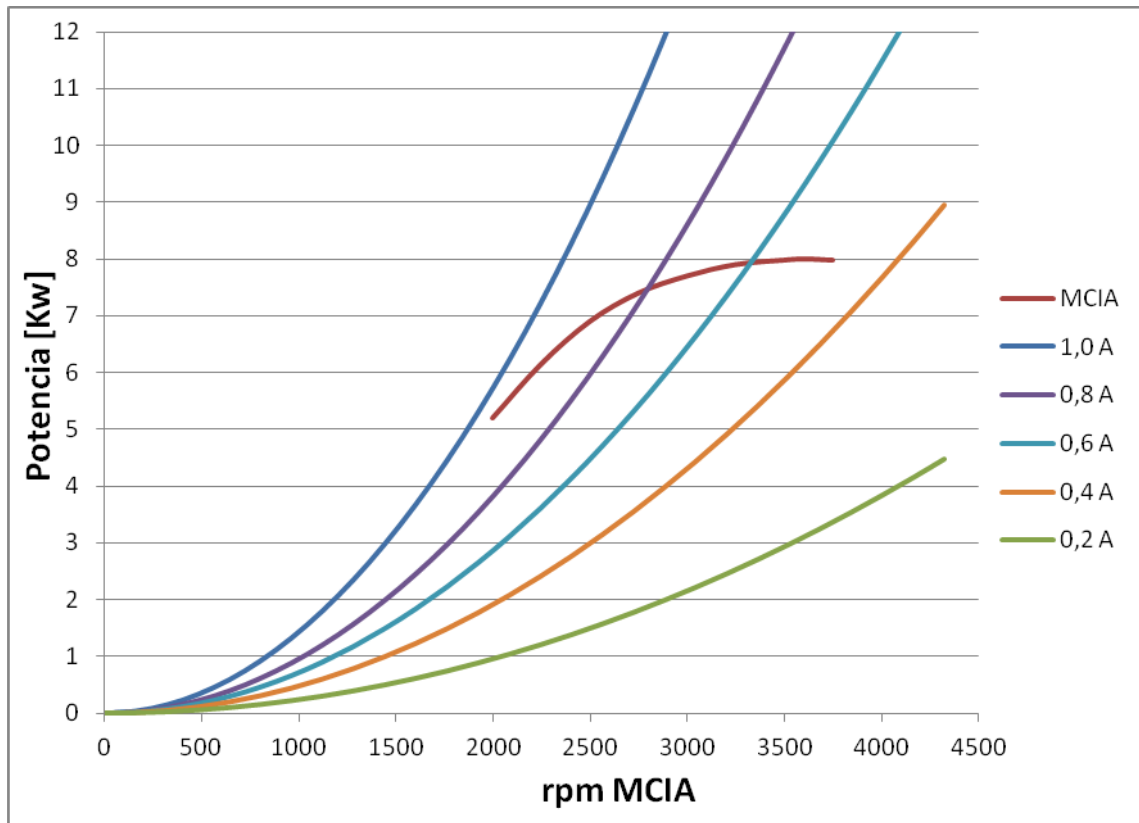
$$P = \frac{9 \times E^2}{R}$$

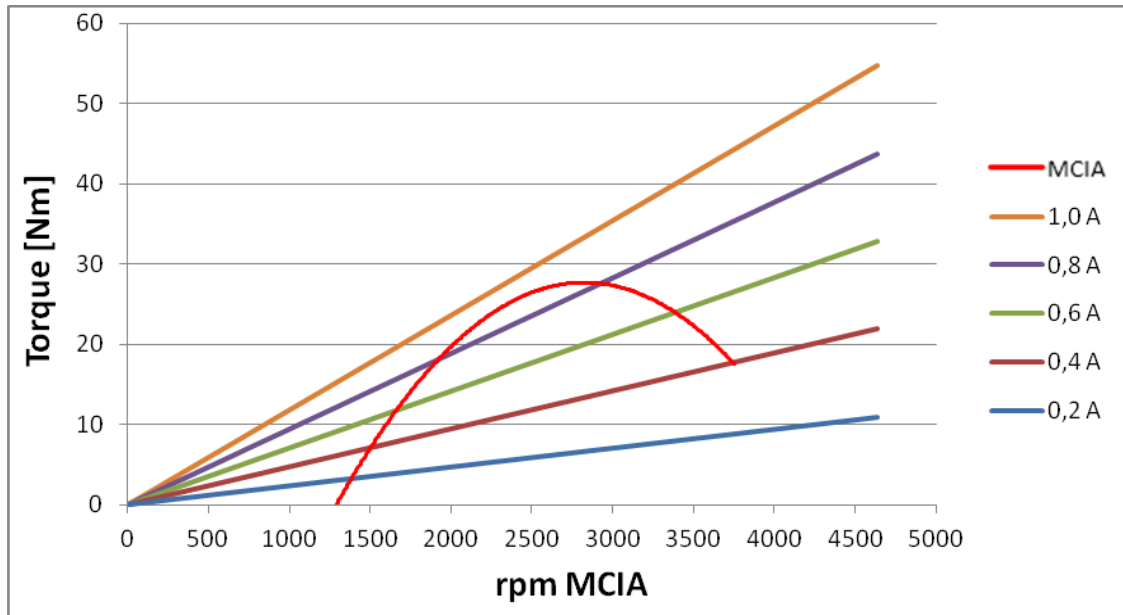
Conexión con rectificador de media onda:

$$P = \frac{(1,17E)^2}{R}$$

En todos los casos vemos que la potencia dependerá del régimen al que gira el generador, la corriente de excitación y el valor de la resistencia “R”. Para obtener valores cuantitativos de la potencia que puede disipar el generador, y contrastarlos con los que entrega el MCI en su rango de velocidades, se plasmaron las ecuaciones antes descritas en una planilla de cálculo. Luego, se fue variando el valor de la resistencia “R” para cada opción hasta comprobar que el generador sea capaz de frenar el motor en todo su rango de funcionamiento.

Como resultado de este análisis se decidió utilizar la conexión con rectificador de media onda y cuatro resistencias de 0,5 ohm en serie para disipar potencia ya que con las conexiones en estrella y en triángulo se necesitaban tres resistencias de 5 y 15 ohm respectivamente. La siguiente figura muestra el gráfico representativo de la potencia entregada por el MCI A y la que sería capaz de disipar el generador eléctrico para diferentes corrientes de excitación.





Motor de arranque

El motor de arranque cumple la función de llevar al MCI A y todos los elementos auxiliares a su régimen de operación. Es indispensable que tenga una potencia capaz de vencer la fricción de todos los elementos y un par de arranque que le permita vencer la compresión inicial del motor de combustión.

Al tratarse de un motor asíncrono comandado por un variador de frecuencia, si se desea, puede utilizarse también como un freno auxiliar, que ayuda a mantener el ensayo a un régimen constante. Es decir, si el motor de combustión interna intenta ir más rápido que el campo inducido por el variador de frecuencia en el motor de arranque, éste, pasará a funcionar como generador. Con la ayuda de unas resistencias auxiliares, es posible disipar esta potencia extra entregada, sin variar la velocidad de giro, ya que ésta se encuentra delimitada por la velocidad de sincronismo y a su vez esta es función de la frecuencia de red (constante).

Para este caso en particular, se disponía de un motor Siemens de 5,5 HP, por lo que simplemente se procedió a verificar si era acorde a la aplicación.

La potencia necesaria para arrastrar el motor de combustión interna se puede estimar sin demasiado error como el 10% de la potencia total del mismo (aproximadamente 1 HP). A esto se debe sumar la potencia necesaria para arrastrar los otros elementos, la cual se supone que es menor ya que solo se debe vencer la fricción de los rodamientos propios de cada elemento. Se puede concluir que sumando todas las potencias nos encontramos muy por debajo de la potencia disponible en el motor de arranque.



Para conocer el par de arranque necesario en el motor se midió, mediante una celda de carga, el momento torsor capaz de vencer la compresión del motor. Luego de realizar los cálculos pertinentes se obtuvo que el momento necesario es de 30 Nm, valor que se encuentra por debajo del par de arranque del motor al cual le corresponden unos 57,1Nm.

Sistema de transmisión MCIA – Generador

POLEAS DENTADAS

Para el caso de la transmisión de potencia entre el eje de salida del MCIA y el eje del generador (paralelos entre sí), luego de analizar el nivel de esfuerzos involucrados y considerar los elementos disponibles en el mercado, se decidió montar un sistema de poleas y correa dentada. Este sistema es considerablemente más económico que una transmisión por engranajes y además posee la capacidad de transmitir grandes potencias sin desplazamiento relativo entre polea y correa.

Para la selección de la polea dentada se recurrió al catálogo de transmisiones de marca Gates, el cual consta de un procedimiento para el dimensionado de la misma, detallado a continuación.

Paso 1: Determinación de la Potencia de diseño.

Dicha potencia surge de la corrección de la potencia nominal por un factor de servicio que se determina teniendo en cuenta las horas de uso y las características de la aplicación.

Potencia nominal: 11Hp

Factor de servicio: 1,8

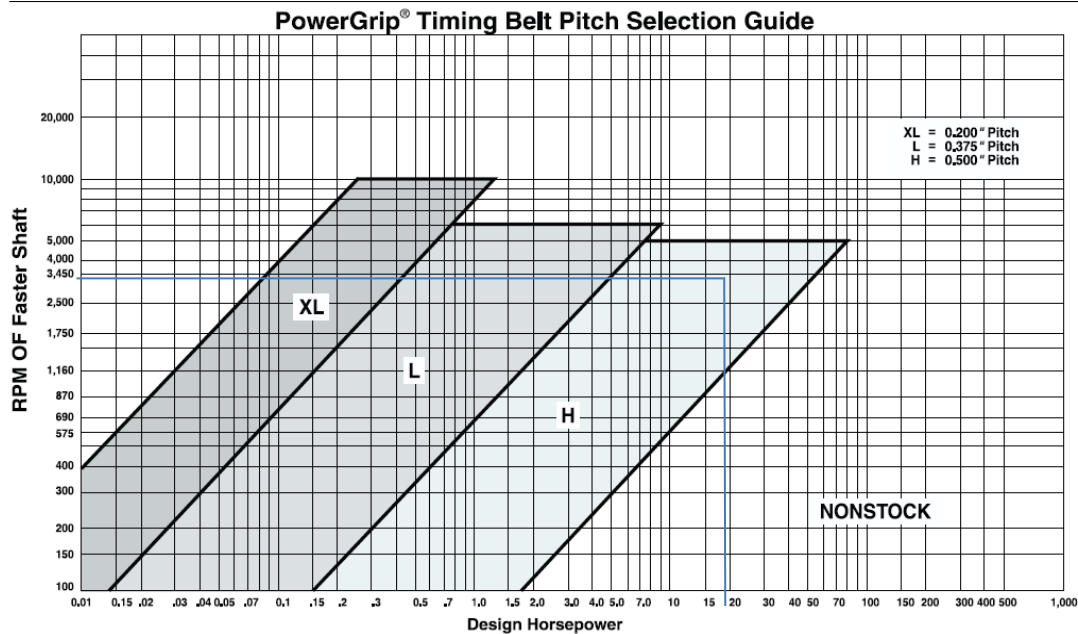
Potencia de diseño: $HP\ Nom \times FS = 19,8\ Hp$

Basic PowerGrip® Service Factors						
Drivell Machine	DriveR					
The drivell machines listed below are representative samples only. Select a drivell machine whose load characteristics most closely approximate those of the machine being considered.	AC Motors: Normal Torque, Squirrel Cage, Synchronous, Split Phase, Inverter Controlled			AC Motors: High Torque, High Slip, Repulsion-Induction, Single Phase, Series Wound, Slip Ring		
	DC Motors: Shunt Wound Stepper Motors			DC Motors: Series Wound, Compound Wound Servo Motors		
	Engines: Multiple Cylinder Internal Combustion			Engines: Single Cylinder Internal Combustion Line Shafts Clutches		
	Intermittent Service (Up to 8 hours Daily or Seasonal)	Normal Service (8 - 16 hours Daily)	Continuous Service (16 - 24 hours Daily)	Intermittent Service (Up to 8 hours Daily or Seasonal)	Normal Service (8 - 16 hours Daily)	Continuous Service (16 - 24 hours Daily)
Brick Machinery (except Pug Mills) Conveyor: Apron, Pan, Bucket, Elevator Extractions, Washers Fans, Centrifugal Blowers Generators & Exciters Hoists Rubber Calendar, Mills, Extruders	1.4	1.6	1.8	1.8	2.0	2.2

Paso 2: Selección del paso de la correa.

Utilizando la potencia de diseño y la velocidad del eje rápido se recurre a un gráfico de selección.

Paso Correa: $H = 0,5''$



Paso 3: Selección de poleas y largo de correa.

En virtud de la geometría del sistema, se procede a seleccionar una combinación de diámetros de poleas y largo de correa apropiado para el espacio y la configuración disponible, que además cumpla con la relación de transmisión necesaria.

La relación de transmisión se obtiene con la velocidad máxima alcanzada por el motor de combustión y la máxima velocidad permitida por el generador, ya que ésta se encuentra limitada, debido a que posee rotor bobinado y a altas frecuencias corre el riesgo de ser centrifugado. Lo mismo sucede con las velocidades mínimas, las cuales corresponden a la velocidad de ralentí en el caso del motor y la velocidad mínima de generación para el caso del generador.

Velocidad max. Motor: 4000 rpm

Velocidad min. Motor: 1500 rpm

Velocidad max. Generador: 2700 rpm

Velocidad min. Generador: 900 rpm

$r_{max} = 1,48$

$r_{min} = 1,66$

Se opta por una relación de transmisión de 1,6. Luego se seleccionan las poleas y correa teniendo en cuenta que la distancia entre ejes de acuerdo a nuestra aplicación debía ser de aproximadamente 475mm.

Seleccionando una polea pequeña de 20 dientes, junto con una polea 32 dientes y una correa de 102 dientes, se cumple satisfactoriamente con los requerimientos.

Utilizando este catálogo, los componentes se corresponden con los números de pieza 20H, 32H y 510H (51 es el largo de la correa en pulgadas). Se obtiene que la distancia entre ejes es de 18,98" o su equivalente de 482mm, ligeramente mayor a lo requerido, por lo que se debe colocar un tensor de correa para absorber dicha diferencia.

Paso 4: Selección del ancho de la correa.

Se recurre a una tabla en la cual la potencia dada debe superar la potencia de diseño, lo cual ocurre con una correa de 2" de ancho.

H (0.500 Inch Pitch) PowerGrip® Power Rating Table — 2.00 Inch Belt Width

RPM of Faster Shaft	Rated Horsepower for Small Sprocket (Number of Grooves and Pitch Diameter, Inches)															
	14H 2.228	16H 2.546	18H 2.865	19H 3.024	20H 3.183	21H 3.342	22H 3.501	24H 3.820	26H 4.138	28H 4.456	30H 4.775	32H 5.093	36H 5.730	40H 6.366	44H 7.003	48H 7.639
725	3.79	4.33	4.87	5.14	5.41	5.68	5.95	6.49	7.03	7.56	8.10	8.63	9.70	10.8	11.8	12.9
870	4.55	5.20	5.84	6.17	6.49	6.81	7.13	7.78	8.42	9.06	9.70	10.3	11.6	12.9	14.1	15.4
950	4.97	5.67	6.38	6.73	7.08	7.43	7.78	8.48	9.18	9.88	10.6	11.3	12.6	14.0	15.4	16.7
1160	6.06	6.92	7.78	8.20	8.63	9.06	9.48	10.3	11.2	12.0	12.9	13.7	15.4	17.0	18.6	20.2
1425		8.48	9.53	10.1	10.6	11.1	11.6	12.6	13.7	14.7	15.7	16.7	18.7	20.7	22.6	24.4
1750		10.4	11.7	12.3	12.9	13.6	14.2	15.4	16.7	17.9	19.1	20.3	22.7	25.0	27.2	29.3
2850			18.7	19.7	20.7	21.6	22.6	24.4	26.3	28.0	29.7	31.4	34.5	37.3	39.8	42.0
3450			22.4	23.5	24.6	25.7	26.8	28.9	31.0	32.9	34.7	36.5	39.6	42.2	44.2	45.7
100	0.52	0.60	0.67	0.71	0.75	0.79	0.82	0.90	0.97	1.05	1.12	1.20	1.35	1.50	1.65	1.79
200	1.05	1.20	1.35	1.42	1.50	1.57	1.65	1.79	1.94	2.09	2.24	2.39	2.69	2.99	3.29	3.59

Finalmente se obtiene la relación de transmisión que cumple con los requisitos de la aplicación.

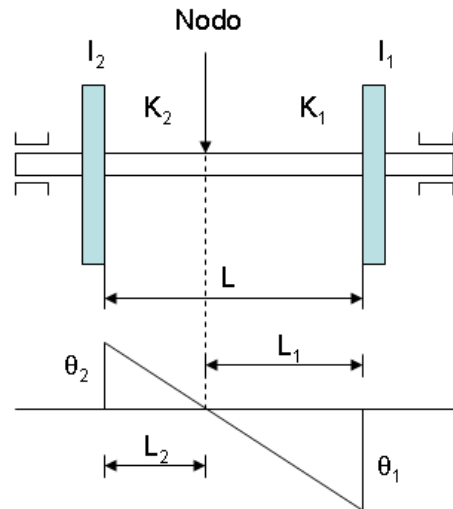
ACOPLAMIENTO ELÁSTICO

El acoplamiento elástico utilizado para vincular el motor y el generador tiene por objetivo principal absorber choques y vibraciones torsionales producidas por el par pulsante característico de un motor monocilíndrico, además, debe soportar pequeñas desalineaciones tanto paralelas como angulares en el acople.

Para la selección del acoplamiento no solo es necesario verificar que se cumplan los requisitos de potencia, torque y revoluciones máximas por minuto; sino que además debe poseer una rigidez torsional tal que el sistema motor-acoplamiento-generador tengan una frecuencia de resonancia que se encuentre fuera del rango de operación del motor, de esta manera se evita el colapso del acople.

Se recurrió a los catálogos de las diferentes marcas de acoplamientos elásticos, en los cuales mediante un simple proceso de selección, que requerían como datos de entrada la potencia a transmitir, la velocidad de giro y un factor de servicio según la aplicación, se escogió el acoplamiento adecuado.

Luego se puede encontrar, a partir de la constante de rigidez torsional del acoplamiento, y con la ayuda de un modelo matemático simplificado, la frecuencia de resonancia del sistema. Para ello todos los elementos pueden ser simplificados como dos masas, con sus inercias equivalentes, acoplados por un eje en común, como se muestra en la figura.



En el análisis del sistema equivalente, los dos discos oscilan torsionalmente a igual frecuencia natural, 180° fuera de fase. Habrá un punto conocido como nodo, en alguna parte del eje, en el cual no habrá deflexión angular. A ambos lados del nodo, los puntos del eje girarán al vibrar en direcciones angulares opuestas. Su frecuencia natural será común:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{I_1}} = \sqrt{\frac{K_2}{I_2}}$$

$$\sqrt{\frac{JG}{L_1 I_1}} = \sqrt{\frac{JG}{L_2 I_2}}$$

$$L_1 I_1 = L_2 I_2 = I_2 (L - L_1)$$

Despejando L_1

$$L_1 = \frac{I_2 L}{I_1 + I_2}$$

Reemplazando L_1

30/04/2013

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica



$$W_n = \sqrt{\frac{K_1}{I_1}} = \sqrt{\frac{JG}{L_1 I_1}} = \sqrt{\frac{JG(I_1 + I_2)}{L_1 I_2}}$$
$$W_n = \sqrt{K_t \frac{(I_1 + I_2)}{I_1 I_2}}$$

A partir de esta ecuación se puede obtener la frecuencia natural del acoplamiento flexible, donde I_1 corresponde a la inercia del motor, I_2 es la inercia equivalente del generador, motor de arranque y poleas principalmente; y K_t a la suma de las constantes elásticas del eje.

Por lo tanto,

$$I_1 = I_{\text{motor}}$$

En nuestro caso al desconocer la inercia del motor, se tomó como referencia la inercia de un motor monocilindrico de igual cilindrada y se confeccionó una tabla variando los valores de la misma.

$$I_2 = I_{\text{polea motor}} + I_{\text{motor de arranque}} + \frac{(I_{\text{generador}} + I_{\text{polea generador}})}{N^2}$$

Como se puede ver, tanto para la inercia del generador, como para la de su polea se debe obtener una inercia equivalente, ya que se encuentran conectados a través de una relación de transmisión. Lo mismo sucede con la inercia del motor de arranque, solo que al ser las relaciones de transmisión iguales, pero una de reducción y otra de multiplicación, se cancelan quedando la inercia sin cambios.

$$\frac{1}{K_t} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_a} \quad ; \quad K_t = K_a$$

La constante de torsión total corresponde a la suma de todas las constantes elásticas de los distintos elementos, y al tratarse de "resortes" sumados en serie se deben sumar las inversas de los mismos. Además, al ser los ejes prácticamente indeformables frente al acoplamiento sus constantes se pueden despreciar para simplificar los cálculos.

Al remplazar los valores,

$$I_{\text{gen}} = 0,216 \text{ kgm}^2$$

$$I_{\text{pm}} = 0,001803 \text{ kgm}^2$$

$$I_{\text{pg}} = 0,02511 \text{ kgm}^2$$

$$I_{\text{marr}} = 0,01473 \text{ kgm}^2$$

$$N = 1,6$$

30/04/2013

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica

 $K_a = 641 \text{ Nm/rad}$

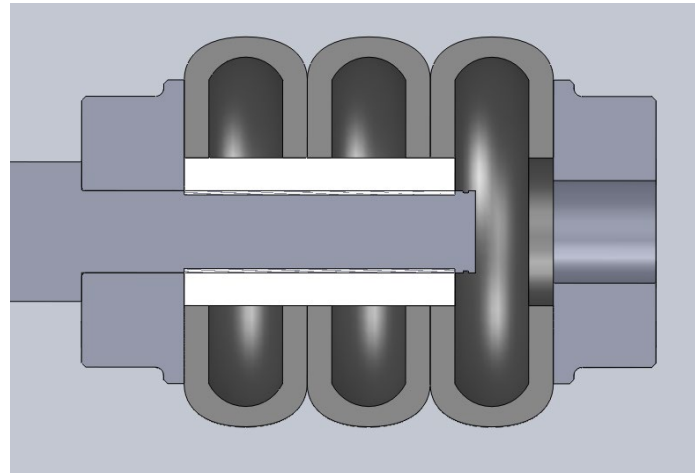
I_{mot}	x1	x2	x3
0,3	1698,8	1201,2	980,8
0,35	1665,7	1177,8	961,7
0,4	1640,4	1159,9	947,1
0,45	1620,5	1145,9	935,6
0,5	1604,4	1134,5	926,3
0,55	1591,1	1125,1	918,6
0,6	1579,9	1117,2	912,2
0,65	1570,4	1110,4	906,7
0,7	1562,2	1104,6	901,9
0,75	1555,0	1099,6	897,8

En la tabla se muestran las frecuencias de resonancia del sistema para distintos momentos de inercia del motor y distinto número de acoplamientos colocados en serie. Como se puede ver la frecuencia natural no varía considerablemente al variar el momento de inercia del motor, por lo que estimar la misma no arroja grandes errores. Además se puede apreciar que colocando un solo acoplamiento la frecuencia natural entra en el rango de funcionamiento del motor, colocando dos nos encontramos cercanos al límite inferior y con tres nos encontramos en una condición de funcionamiento que solo se da en el arranque del motor, la cual dura solo unos pocos segundos.

Es importante aclarar que la frecuencia natural del sistema debe estar por debajo del rango de funcionamiento del motor, ya que si nos encontramos por encima de la misma, al ser el par motor una función no armónica, corremos el riesgo de que alguno de sus componentes de mayor frecuencia coincida con la frecuencia natural del sistema.

Este trabajo se realizó para varios acoplamientos disponibles en el mercado y se seleccionó el más adecuado de acuerdo al precio, disponibilidad y funcionalidad. Finalmente se colocaron 3 acoplamientos flexibles en serie de la marca Gummi modelo A-25, el cual soporta una potencia nominal de 30Hp y un torque máximo de 56Nm.

Para evitar que el acoplamiento central se “centrifugue”, como muestra la figura, se los colocó sobre un eje, donde se les restringió el desplazamiento radial a dos de ellos, dejando que solo puedan deformarse torsionalmente, y se dejó uno de ellos libre para que sea capaz de absorber cualquier desalineamiento paralelo o angular de los ejes.



Sistema de transmisión Generador – Motor de arranque

Tomando en cuenta los mismos criterios que se utilizaron para seleccionar las poleas dentadas de la transmisión MCI-generador, pero ahora para la transmisión motor de arranque-generador, se tomó la decisión de montar un juego de poleas trapecoidales. Para la selección de las mismas se recurrió al catálogo de transmisiones de Gates, el cual incluye un procedimiento para el dimensionado de la mismas, detallado a continuación.

Paso 1: Determinación de la Potencia de diseño.

Dicha potencia surge de la corrección de la potencia nominal por un factor de servicio que se determina teniendo en cuenta las horas de uso y las características de la aplicación.

Potencia nominal: 5,5Hp

Factor de servicio: 1,2

Potencia de diseño: $HP_{Nom} \times FS = 6,6 \text{ Hp}$

Table No. B1 — Service Factors

DriveN Machine	DriveR					
The machines listed below are representative samples only. Select the group listed below whose load Brick Machinery Compressors: Piston Conveyors: Drag, Elevator, Pan, Screw Elevators: Bucket Exciters Extractors Mills: Hammer Paper Pulpers Pulverizers Pumps: Piston Rubber Calendars, Extruders, Mills Textile Machinery	AC Motors: Normal Torque, Squirrel Cage, Synchronous, Split Phase. DC Motors: Shunt Wound. Engines: Multiple Cylinder Internal Combustion.*			AC Motors: High Torque, High Slip, Repulsion-Induction, Single Phase, Series Wound, Slip Ring. DC Motors: Series Wound, Compound Wound. Engines: Single Cylinder Internal Combustion.*		
	1.2	1.3	1.5	1.4	1.5	1.6

30/04/2013

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica

Utilizando la potencia de diseño y la velocidad de giro del eje rápido se recurre al siguiente gráfico de selección.

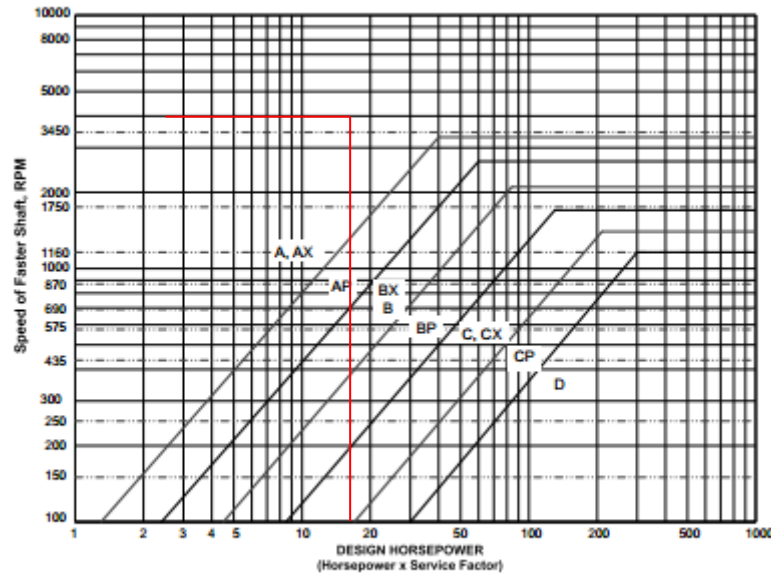


Figure No. B2

Cross Section Selection Chart

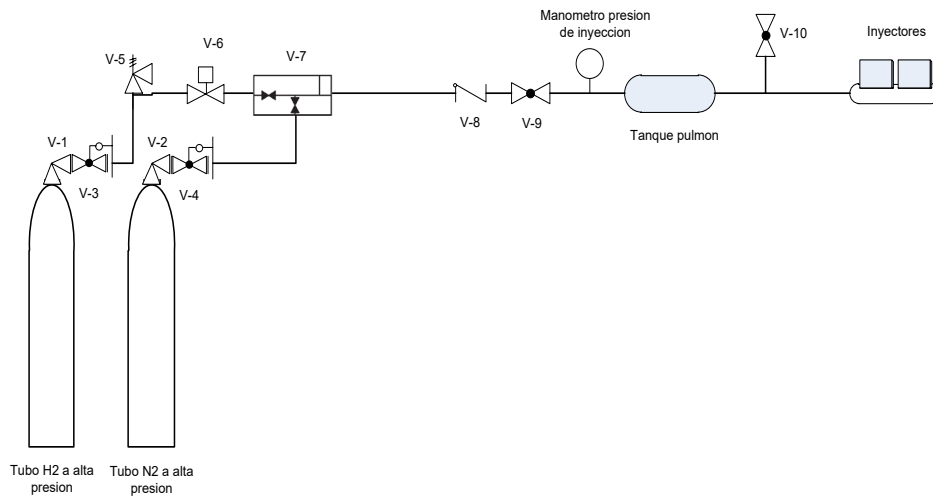
Se determina que el perfil a utilizar es el denominado "A". Se mantiene la misma relación de transmisión que en la transmisión principal pero en lugar de reducción se utiliza para amplificar la velocidad así de esta manera la velocidad de giro del motor de arranque coincide con la velocidad del motor de combustión.

Luego de acuerdo a las poleas disponibles en el mercado se escogen los diámetros de las mismas, la cual corresponde a 100mm de diámetro para el motor de arranque y de 160mm para el generador. De la misma manera se escoge el largo de la correa de tal manera que la distancia entre centros de los ejes sea la adecuada.

5.4 *Conducciones y almacenamiento*

Descripción

A fin de poder alimentar el motor, con hidrógeno proveniente del tubo de almacenamiento a alta presión, se diseña y se construye una tubería en concordancia con todos los requisitos de seguridad y de operación expresados en las normas de referencia. Se utilizan cañerías y accesorios de acero inoxidable AISI 316, con todas las uniones roscadas o con doble virola. A continuación se puede observar el esquema de la instalación con el detalle de todos los componentes.



Componente	Descripción
V-1	Válvula angular H2
V-2	Válvula Angular N2
V-3	Válvula reguladora de presión H2
V-4	Válvula reguladora de presión N2
V-5	Válvula de Seguridad
V-6	Válvula solenoide
V-7	Válvula de bloqueo y purga
V-8	Válvula antiretorno
V-9	Válvula aguja
V-10	Válvula de Purga

Básicamente, la instalación cuenta con un tubo de hidrógeno almacenado a alta presión (200 BAR), con una reguladora de presión instalada a la salida (V-3), que regula la presión de salida de hidrógeno a la presión de trabajo. La presión normal de trabajo de los inyectores es de aproximadamente 4 BAR, por lo que la presión a la salida de la válvula reguladora variará en función del caudal de hidrógeno inyectado.

A continuación de la válvula reguladora de hidrógeno se encuentra la válvula de seguridad (V-5), tarada y certificada a 6 BAR, la cual impedirá que ante una eventual sobrepresión, por falla de alguna de las dos válvulas reguladoras o cualquier otro



evento indeseado, se libere el gas contenido a la atmósfera y de esta manera se evite la falla mecánica de cualquiera de los componentes de la instalación.

Siguiendo aguas abajo, luego de la válvula de seguridad, se encuentra la electroválvula (V-6), elemento que también cumple con cierta función de seguridad, ya que se encuentra asociada eléctricamente a los botones de paro de seguridad y también a el sensor de mezcla explosiva. Esta válvula es del tipo normal cerrado, y cuenta con un solenoide que debe ser activado desde el tablero de control para abrir o cerrar la válvula. Además, esta válvula cerrará automáticamente si el sensor de hidrógeno detecta un 20 % del nivel mínimo de mezcla explosiva en el ambiente. También cerrará inmediatamente si por algún motivo se presiona alguno de los botones de parada de emergencia.

De manera de evitar mezclas explosivas en las tuberías, se instaló en forma paralela un tubo de Nitrógeno (N_2) con el fin de realizar barridos antes y después de usar la instalación, evitando mezclas H_2 /Aire en la línea de conducción. Este tubo también cuenta con una válvula reguladora de presión (V-2), y para realizar los barridos se instaló un manifold (V-7) de dos vías, en el cual entran las líneas provenientes de ambos tubos, y permite seleccionar cuál de las dos líneas continúa aguas abajo.

Antes de ingresar al motor, se encuentra instalada una válvula antiretorno (V-8), una válvula aguja para regular la presión de admisión (V-9) y un manómetro que indica esta presión.

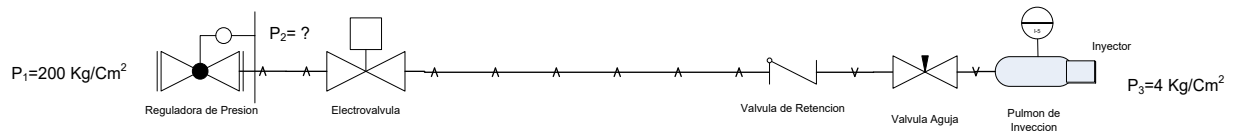
Con el fin de evitar caídas bruscas y oscilaciones de presión en la línea, producto de los grandes caudales que descargan los inyectores en muy poco tiempo, fue necesario instalar un pulmón que funcione a modo de amortiguador, justo antes del ingreso a los inyectores. Además, para la conexión desde el pulmón hasta los inyectores se amplió el diámetro de la cañería, desde $\frac{1}{4}$ " que fue la medida utilizada desde los tubos hasta el pulmón, a $\frac{1}{2}$ " para el tramo desde el pulmón a los inyectores.

Para despresurizar la línea y para realizar los barridos se instaló una válvula de purga entre el pulmón y los inyectores (V-10).

Pérdidas de carga

Para comprobar que la instalación era la adecuada, se calculó la máxima pérdida de carga en función del máximo caudal másico posible, que correspondería a un régimen de máxima carga, con mezcla estequiométrica.

Datos iniciales



Datos de la instalación

DAM	1/4	Pulg
ϵ	0,0015	mm
A_{flujo}	0,000032	M^2
P_{Salida}	4	Kg/Cm^2
	3.87	Atm
T_{amb}	20	$^{\circ}C$
	293,15	K
L	6	m

Datos del hidrógeno

MM	2 gr/mol
γ	1,41 Cp/Cv
μ	0,0085 centipoise

$$Ri = \frac{R}{MM} = \frac{8.314 \frac{M^3 Pa}{K mol}}{0.002 \frac{Kg}{mol}} = 4517 \frac{M^3 Pa}{Kg K}$$

$$P V = nRT = \frac{mRT}{MM} \rightarrow \rho = \frac{P MM}{R T}$$

$$\rho = \frac{3.87 \text{ Atm} \times 2 \frac{\text{gr}}{\text{Mol}}}{0.082 \frac{\text{Atm l}}{\text{Mol K}} \times 293.15 \text{ K}} = 0.322 \frac{\text{gr}}{\text{l}}$$

$$\dot{m} = 2.39 \frac{\text{gr}}{\text{s}} = Q \times \rho$$

$$Q = \frac{3 \frac{\text{gr}}{\text{s}}}{0.322 \frac{\text{gr}}{\text{l}}} = 7.42 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = \frac{\left(\frac{3 \text{ gr}}{\text{s}} \right)}{0,000032 \text{ m}^2} = 75.46 \frac{\text{Kg}}{\text{s m}^2}$$

$$Re = \frac{G D}{\mu} = \frac{93.75 \frac{Kg}{s m^2} \times 0.25 \times 0.0254 m}{0.0085 \frac{Pa s}{1000}} = 56\,378$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0015 mm}{\frac{1}{4} \times 25.4 mm} = 0.000236$$

Obteniendo f de la ecuación de Haaland

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon_r}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right]$$

$$f = \left\{ \frac{1}{-1.8 \log \left[\left(\frac{0.000236}{3.7} \right)^{1.11} + \left(\frac{6.9}{56\,378} \right) \right]} \right\}^2 = 0.02$$

Para flujo compresible isotérmico tenemos

$$(P_2)^2 - (P_3)^2 = f Ri T G^2 \frac{L}{D}$$

$$(P_2)^2 = f Ri T G^2 \frac{L}{D} + (P_3)^2$$

$$P_3 = 4 \frac{Kg}{cm^2} = 3.87 \text{ Atm} = 392\,266.08 \text{ Pa}$$

$$(P_2)^2 = 0.02 \times 4517 \frac{m^3 Pa}{Kg K} \times 293.15 K \times \left(75.46 \frac{Kg}{s m^2} \right)^2 \frac{6 m}{0.00635 m} + (392\,266.08 Pa)^2$$

$$P_2 = \sqrt{3.73 \times 10^{11}} = 539\,553.48 \text{ Pa}$$

$$P_2 = 539\,553.35 \text{ Pa} = 5.5 \frac{Kg}{cm^2} = 5.32 \text{ Atm}$$

$$\Delta P = P_2 - P_3 = 1.5 \frac{Kg}{cm^2}$$

VISCOSIDADES DE GASES*
Para usarse como Coordenadas con la Fig. 15

Gas	X	Y
Acetato de Etilo	8.5	13.2
Acetona	8.9	13.0
Acetileno	9.8	14.9
Acido Acético	7.7	14.3
Agua	8.0	16.0
Aire	11.0	20.0
Alcohol Etilico	9.2	14.2
Alcohol Metilico	8.5	15.6
Alcohol Propilico	8.4	13.4
Amoniaco	8.4	16.0
Argón	10.5	22.4
Benceno	8.15	13.2
Bromo	8.9	19.2
Buteno	9.12	13.7
Butileno	8.9	13.0
Bióxido de Azufre	9.6	17.0
Bióxido de Carbono	9.5	18.7
Bisulfuro de Carbono	8.0	16.0
Bromuro de Hidrógeno	8.8	20.9
Cianógeno	9.2	15.2
Ciclobexano	9.2	12.0
Cianuro de Hidrogeno	9.8	14.9
Cloro	9.0	18.4
Cloroformo	8.9	15.7
Cloruro de Etilo	8.15	15.6
Cloruro de Hidrógeno	8.8	18.7
Cloruro de Nitrosilo	8.0	17.6
Etano	9.11	14.5
Eter Etilico	8.9	13.0
Etileno	9.5	15.1
Flúor	7.31	23.8
Freon 11	10.6	15.1
Freon 12	11.1	16.0
Freon 21	10.8	15.3
Freon 22	10.1	17.0
Freon 113	11.3	14.0
Helio	10.9	20.5
Hexano	8.6	11.8
Hidrógeno	11.2	112.4
3H ₂ + 1N ₂	11.2	117.2
Yodo	9.0	18.4
Yoduro de Hidrógeno	9.0	21.3
Mercurio	5.3	22.9
Metano	9.9	15.5
Monóxido de Carbono	11.0	20.0
Nitrógeno	10.6	20.0
Oxido Nitrico	10.9	210.5
Oxido Nitroso	8.8	19.0
Oxígeno	11.0	211.3
Pentano	7.0	12.8
Propano	9.7	12.9
Propileno	9.0	13.8
Sulfuro de Hidrógeno	8.6	18.0
Tolueno	8.6	12.4
2, 3, 3-Trimetilbutano	9.5	10.5
Xenón	9.3	23.0

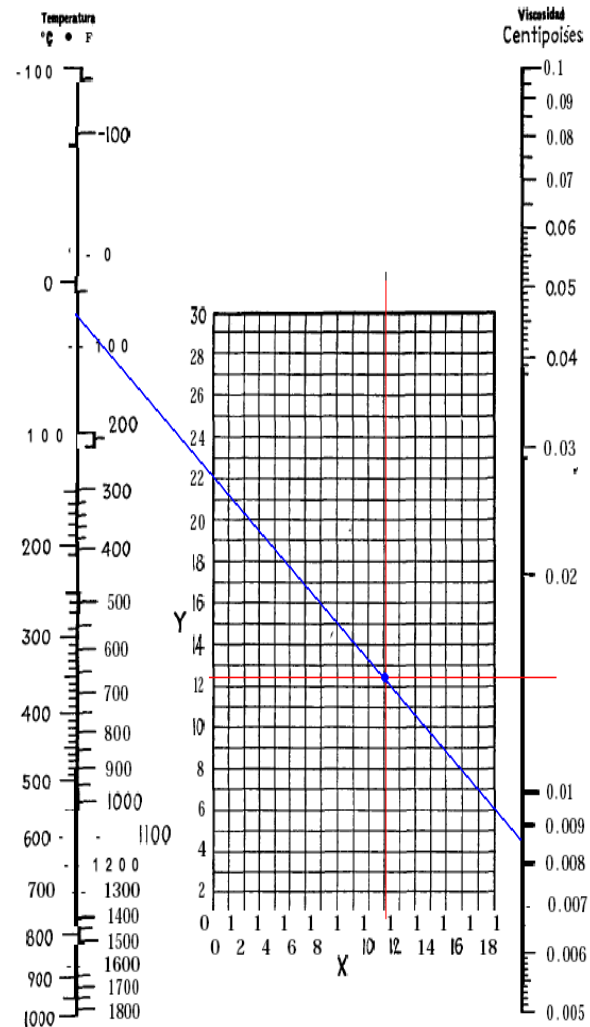


Fig. 15. Viscosidades de Gases. (Perry, "Chemical Engineers' Handbook", 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950)

Aprovechamiento energético del tubo de H₂

Se dispone de un tubo de hidrógeno de 0,04 m³ a 150 bares (lo que corresponde al comprimir isotérmicamente 6 m³ de hidrógeno a CNPT), una válvula reguladora de presión es la encargada de mantener una presión de inyección constante de 4 bares. En lugar de la reguladora se podría utilizar algún dispositivo que expanda el gas entre estas presiones para aprovechar la energía que ese proceso conlleva.

Para tener una idea de cuanta energía se está desperdiciando realizamos dos cálculos; uno que supone una expansión adiabática mientras que el otro una isotérmica.



La energía que aprovechamos del tubo utilizando la válvula reguladora de presión es solo la que hay almacenada por el poder calorífico de la masa de hidrógeno contenido:

Volumen de hidrógeno a CNPT: $V_0 = 6 \text{ m}^3$

Densidad del hidrógeno a CNPT: $\rho_0 = 0,0899 \text{ Kg/m}^3$

Masa de hidrógeno en el tubo: $m_{\text{tubo}} = V_0 \times \rho_0 = 0,539 \text{ kg}$

Volumen del tubo de hidrógeno suponiendo una compresión isotérmica y utilizando la ecuación de gases ideales:

$$P_{\text{tubo}} \times V_{\text{tubo}} = P_0 \times V_0 \rightarrow V_{\text{tubo}} = 0,04 \text{ m}^3 = 40 \text{ lt}$$

Poder Calorífico Inferior del hidrógeno: PCI = 119,88 MJ/Kg

Energía aprovechada del tubo de hidrógeno: $E = m \times \text{PCI} = 64,66 \text{ MJ}$

Veamos primero que energía podríamos aprovechar realizando una expansión adiabática. Utilizamos la ecuación de gases ideales para procesos adiabáticos:

$$P \times V^\gamma = \text{Ctte}$$

Coefficiente politrópico del hidrógeno $\gamma = 1,4094$.

Presión inicial: $P_1 = 150 \text{ bar}$.

Volumen inicial: $V_1 = 0,04 \text{ m}^3$.

Presión final: $P_2 = 4 \text{ bar}$.

$$V_2 = \left[\frac{P_1 \times V_1^\gamma}{P_2} \right]^{\frac{1}{\gamma}} = 0,523 \text{ m}^3$$

Volumen final:

Trabajo de expansión adiabática:

$$W = -P \times dV \rightarrow P = \frac{P_1 \times V_1^\gamma}{V^\gamma} \rightarrow W = -P_1 \times V_1^\gamma \times \int_{V_1}^{V_2} V^{-\gamma} dV$$
$$W = -\frac{P_1 \times V_1^\gamma}{\gamma - 1} \times [V^{\gamma-1}]_{V_1}^{V_2} \rightarrow W = \frac{P_1 \times V_1}{1 - \gamma} \times \frac{V_1^\gamma}{V_1} \left[\frac{1}{V_2^{\gamma-1}} - \frac{1}{V_1^{\gamma-1}} \right]$$



$$W = \frac{P_1 \times V_1}{1 - \gamma} \times V_1^{\gamma-1} \left[\frac{1}{V_2^{\gamma-1}} - \frac{1}{V_1^{\gamma-1}} \right] \rightarrow W = \frac{P_1 \times V_1}{1 - \gamma} \times \left[\frac{V_1^{\gamma-1}}{V_2^{\gamma-1}} - \frac{V_1^{\gamma-1}}{V_1^{\gamma-1}} \right]$$
$$W = \frac{P_1 \times V_1}{1 - \gamma} \times \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 \right] \rightarrow W = 0,954 \text{ MJ}$$

$$\Delta E = 100 \times 0, \frac{954}{64},66 = 1,47 \%$$

Expandiendo el gas adiabáticamente podríamos obtener del tubo un 1,47 % más de energía.

Con una expansión isotérmica:

$$P \times V = n \times R \times T = \text{Cte}$$

Presión inicial: $P_1 = 150 \text{ bar}$.

Volumen inicial: $V_1 = 0,04 \text{ m}^3$.

Presión final: $P_2 = 4 \text{ bar}$.

$$\text{Volumen final: } V_2 = \frac{P_1 \times V_1}{P_2} = 1,5 \text{ m}^3$$

Temperatura: $T = 293 \text{ K}$.

Masa molar del hidrógeno: $M = 0,002016 \text{ kg/mol}$.

Constante universal de los gases: $R = 8,314 \text{ J/(mol K)}$.

Trabajo de expansión adiabática:

$$W = -P \times dV \rightarrow P = \frac{n \times R \times T}{V} \rightarrow W = -n \times R \times T \times \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} \times dV$$

$$W = -n \times R \times T \times [\ln V]_{V_1}^{V_2} \rightarrow W = \frac{m}{M} \times R \times T \times [\ln V_2 - \ln V_1]$$

$$W = \frac{m}{M} \times R \times T \times \left[\ln \frac{V_2}{V_1} \right] \rightarrow W = 2,362 \text{ MJ}$$

$$\Delta E = 100 \times 2, \frac{362}{64},66 = 3,65 \%$$

Expandiendo el gas isotérmicamente se podría obtener del tubo un 3,65 % más de energía.

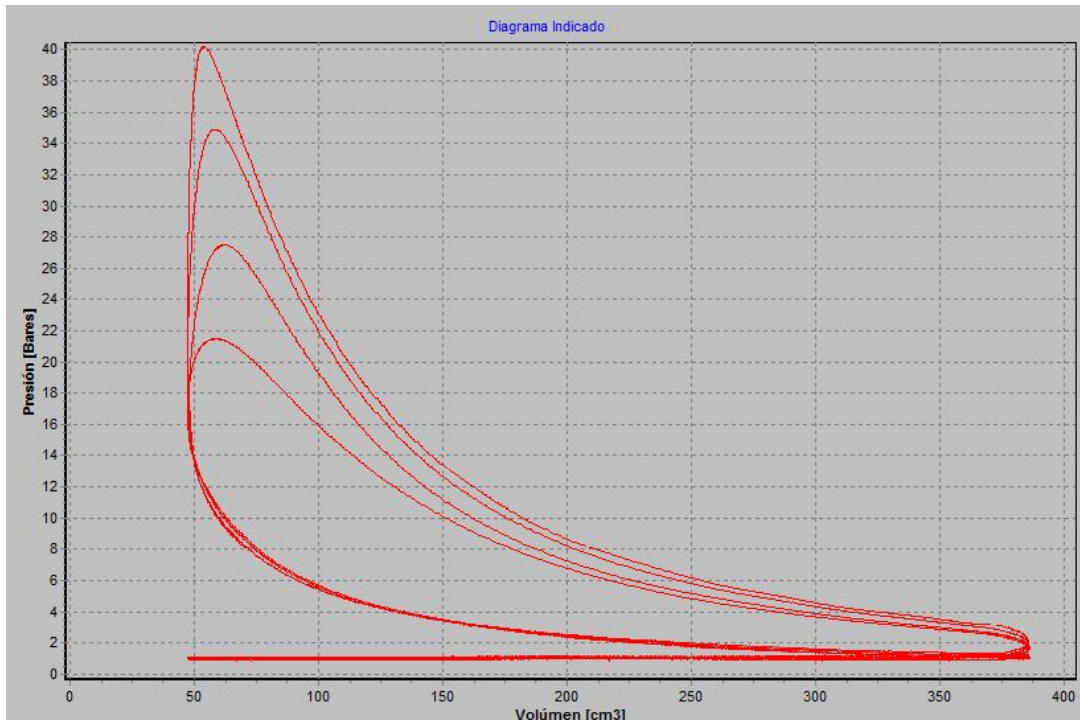


6. Ensayos realizados y resultados

Aún no se cuenta con un sistema de mediciones de caudales máscicos de hidrógeno y de aire, calculándose, los tiempos de inyección en función de la presión de alimentación y el coeficiente de descarga de los inyectores. Por esto es que los gastos máscicos de combustible y las relaciones de mezcla que aquí se mencionan son estimados mediante cálculo y no medidos.

Previamente a cada ensayo, se tienen en cuenta los parámetros operativos y ambientales para estimar el momento inicio de la inyección y su duración para entrar dentro del rango de inflamabilidad del hidrógeno. Una vez en marcha, estos parámetros pueden ser cambiados gradualmente para ensayar diferentes condiciones operativas. Dado que aún no se ha implementado una unidad de control electrónico (ECU), el motor no tiene una operación autónoma como la que posee funcionando con el carburador original.

Se realizaron ensayos con mariposa totalmente abierta comenzando desde la relación de mezcla más pobre posible y paulatinamente se fueron aumentando los tiempos de inyección para enriquecer la mezcla y desarrollar más potencia. La siguiente figura muestra cuatro ciclos operativos del motor con diferentes cantidades de combustible inyectado mostrándose claramente la posibilidad de regular potencia en un amplio rango sin generar pérdidas de bombeo por estrangulación de la admisión. Puede observarse además cómo las mezclas muy pobres se queman lentamente tal como se comentó anteriormente.

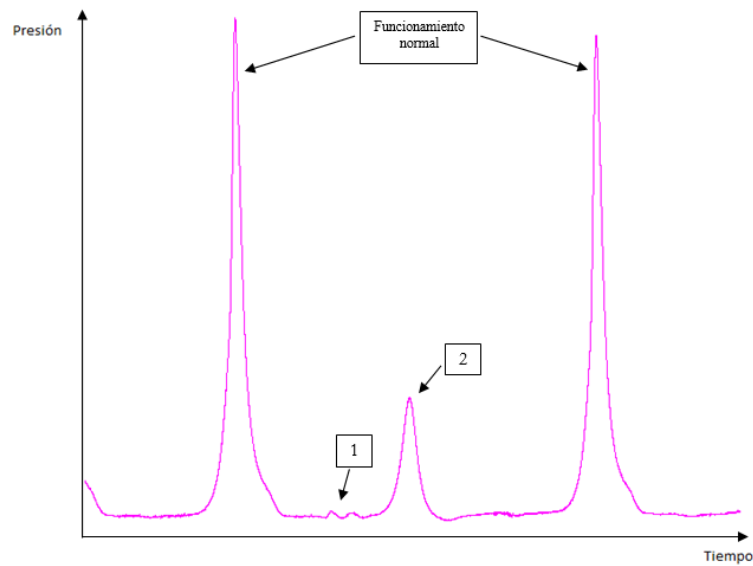


Se observó claramente que si se inyecta una misma cantidad de combustible pero sin seguir la estrategia de admitir primero aire, se generan contraexplosiones en la admisión (ver Figura siguiente) si se está operando a potencias relativamente altas. En estas condiciones, variando el esquema de tiempos de inicio de inyección, disminuye esta tendencia.

Cuando el motor opera con carga parcial, la temperatura de los gases residuales disminuye y el efecto de contra explosión se atenúa. Por esto es que en caso de utilizar las técnicas convencionales de formación externa de mezcla, resulta difícil alcanzar altas potencias sin encontrar el problema de retroceso de llama en la admisión.

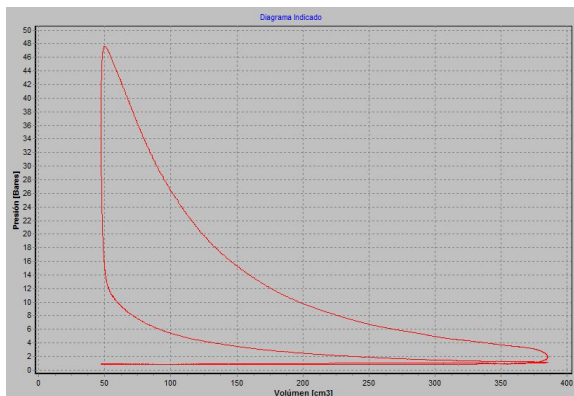
Diversos autores informan que relaciones del orden del 50% de la estequiométrica constituyen el límite a partir del cual aparecen contraexplosiones en la admisión si se realiza una formación de mezcla homogénea en la admisión (como sucedería con un carburador).

Se realizaron pruebas en el punto de máximo par del motor operando con nafta (26 Nm a 2500 RPM). Como se comentó anteriormente, asumiendo como única variable el calor aportado por el combustible que puede ingresar en el cilindro en condiciones de mezcla estequiométrica, operando con hidrógeno debería alcanzarse un par de torsión de 21.6 Nm.

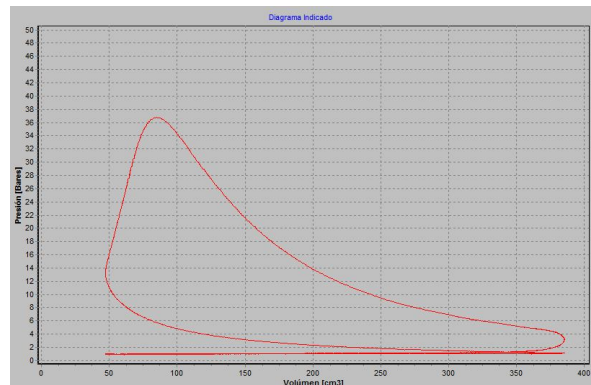


Contra explosión en la admisión detectada en cámara de combustión (1). Luego de este fenómeno, se produce un ciclo de arrastre sin combustión (2).

Cabe destacar que debido a las altas velocidades de quemado, el avance de encendido debe atrasarse notoriamente cuando se opera con hidrógeno. A fin de poner en evidencia este efecto, las siguientes figuras muestran ciclos operativos con hidrógeno y con nafta respectivamente operando con el avance óptimo para hidrógeno.



Ciclo medido operando con hidrógeno



Ciclo medido operando con nafta

En las pruebas realizadas hasta el momento, se logró alcanzar un par de torsión de 16 Nm lo que representa el 74% del máximo teóricamente alcanzable y está bastante por encima del que se considera como máximo posible para mezclas homogéneamente formadas antes de ingresar por la válvula de admisión. Este hecho indicaría en principio el éxito parcial de la técnica de inyección utilizada aunque por estar actualmente en una etapa de inicio de pruebas, es de esperar que optimizando la técnica de inyección se pueda mejorar la potencia máxima a alcanzar, lo que constituirá gran parte del trabajo futuro a realizar con este equipo.



Tal como se comentó anteriormente, este motor en particular fue elegido por su bajo costo y por la facilidad que presenta para ser modificado para el uso con un combustible diferente, sin embargo, presenta algunas características que tienden a perjudicar el correcto funcionamiento con hidrógeno. Una de ellas es el relativamente alto valor del retraso del cierre de admisión (aproximadamente $RCA=90^\circ$), este retraso existe para aprovechar el efecto dinámico de los gases de admisión que al momento de llegar el pistón al punto muerto inferior (PMI), tienen una alta energía cinética por lo que seguirán ingresando al cilindro aún con el pistón subiendo en los primeros grados de giro de la carrera de compresión.

Obviamente, el cálculo del valor óptimo de retraso en el cierre de admisión depende de muchos parámetros, entre otros, de las RPM a las que se quiere optimizar el motor y del largo del conducto de admisión. A juicio de los autores, el valor de RCA es muy alto para este motor que funciona a bajas RPM y con conductos no sintonizados, circunstancia que probablemente surja de la utilización de un árbol de levas idéntico al que el mismo fabricante utiliza para otra aplicación. Debe tenerse en cuenta además que la inyección de hidrógeno en la admisión, debido a su alto volumen específico, modifica la dinámica de gases en el conducto por lo que incluso con un motor cuidadosamente sintonizado para nafta, dejaría de estar igualmente sintonizado para su uso con hidrógeno.

Un elevado RCA implica que puede haber reflujo de mezcla combustible hacia el tubo de admisión al iniciarse la carrera ascendente del pistón haciendo que una pequeña porción de mezcla combustible permanezca cerca de la válvula de admisión siendo la responsable de una contra explosión en el siguiente ciclo.

Por esto es que se está pensando en realizar modificaciones al esquema de tiempos de distribución del motor para minimizar esta posibilidad. Dado que estas modificaciones no son sencillas, se está implementando un esquema de funcionamiento de "ciclo nulo intercalado", es decir, que luego de un ciclo convencional de cuatro tiempos, se realiza uno con aspiración de aire pero sin inyección de combustible, asegurando así un barrido total de la cámara de combustión y tubo de admisión para un siguiente ciclo operativo. Se pretende de esta manera investigar las condiciones de funcionamiento de máximas prestaciones eliminando la posibilidad de acumulación de hidrógeno de ciclos anteriores.

Un sistema de inyección directa en el cilindro al inicio de la carrera de compresión elimina estos problemas, por lo que, a pesar de constituir una alternativa de cierta complejidad mecánica, los autores consideran la posibilidad de implementación de la misma a futuro.



7. Conclusiones y objetivos futuros

1. Se han implementado las modificaciones necesarias para permitir la operación de un motor monocilíndrico de pequeña cilindrada utilizando hidrógeno como combustible.
2. Se colocaron sensores de posición angular del cigüeñal y un sensor de presión en cámara de combustión para relevamiento y estudio del ciclo operativo del motor.
3. Se desarrolló un sistema de inyección que permite controlar los parámetros de la misma para asegurar que sólo ingrese aire al inicio de la admisión minimizando así las posibilidades de ocurrencia del fenómeno de contra explosión.
4. Se desarrolló un banco de pruebas especialmente adaptado a las particularidades de los ensayos a realizar con este combustible.
5. Se implementaron ensayos en los que se logró alcanzar altos valores de potencia respecto de los máximos teóricamente alcanzables.
6. Se está implementando un esquema de funcionamiento de “ciclo nulo intercalado” para asegurar un barrido más eficiente de posibles acumulaciones de hidrógeno en el tubo de admisión para estudiar más a fondo el fenómeno de contra explosión.
7. Se estudiará la posibilidad de modificar el diagrama de distribución (árbol de levas) para optimizarlo al uso de hidrógeno.
8. Se estudiará la posibilidad de implementar un sistema de inyección directa en cilindro independizando así el proceso de renovación de la carga del de alimentación de combustible para lograr incrementar la potencia y minimizar la posibilidad de contra explosiones.