



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

## FoDAMI

## ADAPTACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA PARA USAR HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

**Daniel Barilá<sup>\*1</sup>, Luís Bugna<sup>1</sup>, Matías Llansa<sup>1</sup>, Maximiliano Bossolasco<sup>1</sup>, William Hughes<sup>1</sup>,  
Germán Soria<sup>1</sup>, Pedro Kolodka<sup>1</sup> y Alejandro Münnemann<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco  
Ruta prov. Nº 1 km 4, Comodoro Rivadavia, Argentina  
correo-e: dbarila@unpata.edu.ar.

### 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.

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 [1]. 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 Facultad de Ingeniería de la UNPSJB decidió incursionar en la investigación de este tipo de motores y para ello implementó 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" [2].

Se realizaron modificaciones para poder sensar la presión instantánea del ciclo y se realizaron las correspondientes mediciones de prestaciones del motor adaptado.

**Palabras Claves:** Motor de combustión interna, Hidrógeno, Banco de pruebas.



## 1. INTRODUCCIÓN

Para la realización de este proyecto se implementaron modificaciones sobre un motor monocilíndrico Honda GX 340 de  $337 \text{ cm}^3$  que brinda una potencia máxima de 8 KW a 3600 RPM y un par torsor máximo de 26,4 Nm a 2500 RPM utilizando nafta como combustible.

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta al utilizar hidrógeno es la posibilidad de que se produzcan contra explosiones. 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 por ejemplo de una bujía) es necesario no sólo alcanzar una determinada temperatura sino que además hay que aportar un mínimo de energía de ignición [3]. 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 [4].

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. La Figura 1 muestra el fenómeno de contraexplosión en la admisión detectado por un sensor de presión en cámara de combustión cuyos detalles de instalación se describen más adelante.

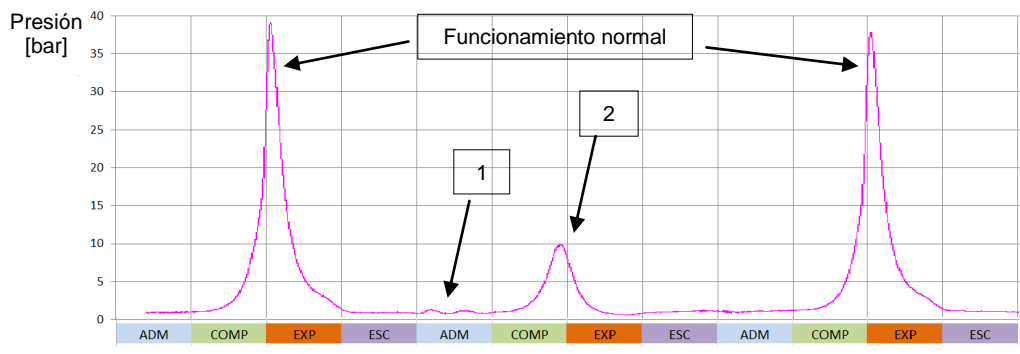


Figura 1 Contra explosión en la admisión detectada en cámara de combustión (1). Luego de este fenómeno, se produce un ciclo de arrastre sin combustión (2).

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.

## 2. ESTRATEGIA DE FORMACIÓN DE MEZCLA

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  $1.18 \text{ kg/m}^3$  mientras que la del hidrógeno en las mismas condiciones es de  $0.08201 \text{ kg/m}^3$  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. DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES RELIZADAS EN EL MOTOR**

Se realizaron adaptaciones en el tubo de admisión para instalar dos inyectores de un equipo comercial de GNC, éstos fueron ubicados lo más cerca posible de la válvula de admisión para facilitar la implementación de la estrategia de inyección secuenciada evitando lo más posible la dilución con el aire que se encuentra en el tubo de admisión en el recorrido de combustible desde el inyector hasta entrar en el cilindro.

Se instaló un codificador angular electrónico “encoder” en el cigüeñal con el propósito de contar con una referencia precisa de la posición angular del mismo. Este encoder emite dos salidas

digitales, una de ellas entrega un pulso por cada vuelta de giro y la otra 360 pulsos por vuelta. Ambas son utilizadas para poder relevar con precisión la presión en el cilindro, tarea para la que es necesario contar con gran precisión angular ya que esta influye notoriamente en los cálculos de trabajo indicado [5] y en el estudio de diversos parámetros de interés en la evaluación del proceso de combustión. La señal de un pulso por vuelta, se sincroniza con el punto muerto superior para utilizarla como referencia y sincronizar la inyección y el encendido.

Dado que es necesario identificar el PMS de final de compresión del correspondiente al final de escape e inicio de admisión, se colocó adicionalmente un sensor magnético (tipo pick up Hall) que toma una referencia de posición del PMS pero en este caso desde el árbol de levas. El análisis conjunto de las señales de uno por vuelta del encoder con el del sensor Hall (de baja precisión angular) permite identificar cuál de los dos PMS se está detectando para sincronizar adecuadamente las secuencias de inyección y encendido. La figura 2 muestra esquemáticamente las secuencias de inyección y encendido conjuntamente con las señales de referencia del encoder y del sensor Hall.

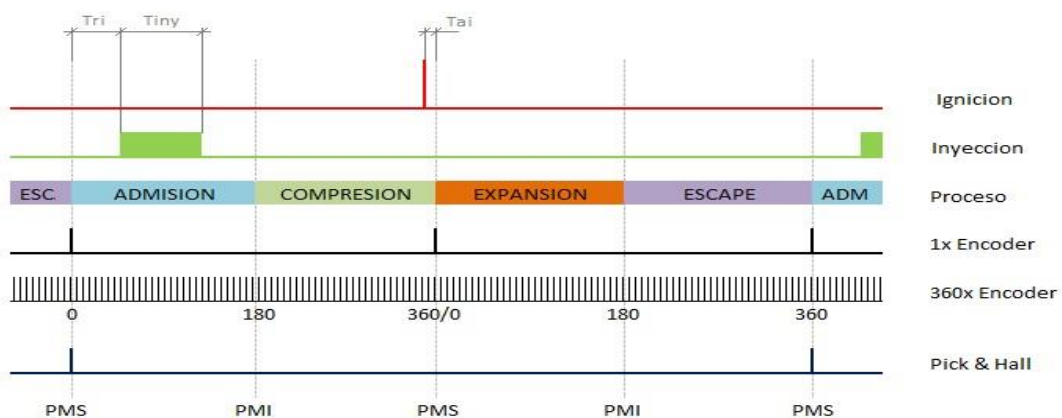


Figura 2 Secuencia de inyección y encendido

Para el sensado de presión en cámara de combustión, se practicaron las modificaciones necesarias en la tapa de cilindro, el mismo se colocó de tal manera que quede totalmente enrasado con la superficie interna de la tapa para evitar conductos que generan pulsaciones ante cambios bruscos en la presión. El sensor utilizado es del tipo piezo eléctrico marca Kistler modelo 6067 C1. La Figura 3 muestra la disposición del sensor de presión instantánea en la cámara de combustión.

Con la finalidad de poder detectar el paso de mezcla pobre a rica se instaló en el escape una sonda lambda, además, se instaló un sensor de temperatura de escape.

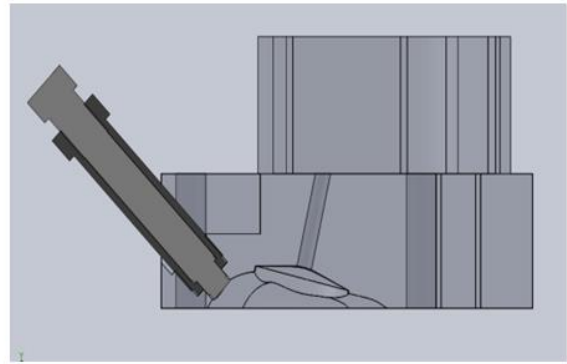
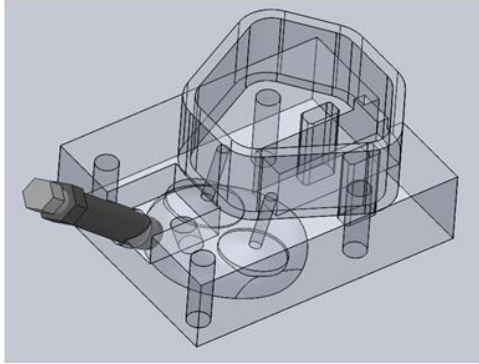


Figura 3 Ubicación del sensor de presión en cámara de combustión

#### 4. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y SUMINISTRO DE HIDRÓGENO

El motor funciona con hidrógeno industrial proveniente de un tubo que lo contiene a 150 bar de presión. Todas las cañerías y accesorios utilizados cumplen con los estándares específicos para instalaciones de conducción y almacenamiento de hidrógeno, la línea de alimentación sale del tubo, luego de la válvula manual de corte en alta presión, se instaló una válvula reguladora que baja la presión a 4 bar. Aguas abajo, se instaló una electroválvula que puede accionarse automáticamente en función de la señal de alarma que emite un sensor de presencia de hidrógeno instalado en proximidades del motor o bien desde un pulsador de emergencia instalado en el tablero de control.

Antes de llegar a los inyectores, el combustible pasa por un pequeño depósito que actúa como amortiguador de pulsaciones de presión, estas son bastante importantes en caso de no existir este elemento debido a que el suministro de combustible se realiza con caudales de valor relativamente altos durante muy cortos períodos de tiempo.

#### 5. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

Se pretende poder realizar pruebas en condiciones particulares como funcionamiento a mariposa totalmente abierta regulando potencia con diferentes grados de riqueza de mezcla, estas son condiciones que pueden ser bastante inestables para el motor por lo que resulta de interés asegurar la velocidad de giro independientemente de la potencia entregada.

La idea de lograr un banco compacto y relativamente portátil condicionó la configuración general del banco que difiere bastante de lo que resulta habitual en instalaciones tradicionales. Por otra parte, la necesidad de lograr funcionamiento estable y a velocidad constante, sumado



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

a la disponibilidad de equipos en desuso que podían ser reciclados, fueron los aspectos que definieron la utilización de un sistema de frenado basado en un generador eléctrico que recibe la potencia del motor y la disipa en resistencias externas conjuntamente con un motor de arranque relativamente potente para asegurar la posibilidad de ensayos de arrastre prolongados y a alta velocidad.

Para lograr una disposición compacta, se analizaron diversas configuraciones y se optó por la que se muestra en la Figura 4 (a). Se puede identificar una 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 que tiende a hacer oscilar al generador y que es el mismo entregado por el motor.

Todos los momentos torsores debidos a rozamientos de transmisiones o de los rodamientos de generador principal y motor de arranque, se suman al par torsor del generador por lo que, debido a la configuración de la instalación, actúan como complemento del efecto de frenado y son medidos por la instrumentación del banco sin generar errores intrínsecos por principio de funcionamiento.

Como muestra la Figura 4 (b), la base basculante se encuentra vinculada a la estructura principal mediante una celda de carga, la cual se encarga de medir la fuerza resultante debido al par de torsión entregado por el motor.

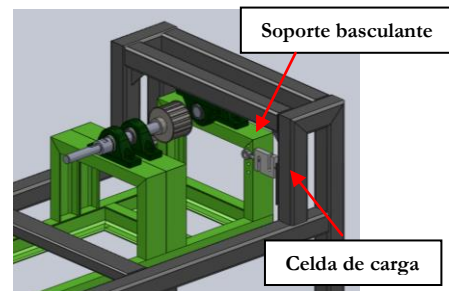
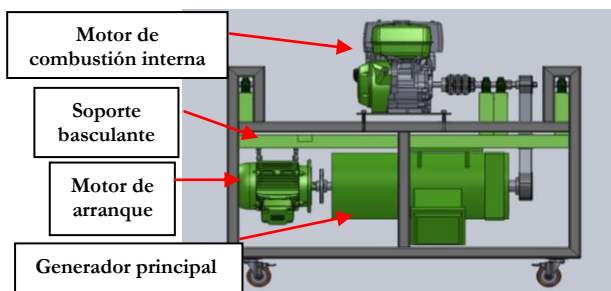


Figura 4 (a) Banco dinamométrico

Figura 4 (b) Vinculación de base basculante

## 6. PRUEBAS REALIZADAS

Los ensayos realizados hasta el momento constituyen las primeras pruebas desde que el equipo está en condiciones operativas y se ha apuntado fundamentalmente a poner a punto el equipamiento y obtener conclusiones preliminares que permitan vislumbrar líneas de trabajo futuras. Los ensayos realizados hasta este momento no son normalizados, pero, se mantuvieron condiciones que permiten obtener resultados suficientemente precisos para lo que usualmente se pretende en una etapa preliminar de desarrollo.

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 estimadas mediante cálculo.

Previamente a cada prueba, 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 tan autónoma como la que posee funcionando con el carburador original.

Se realizaron pruebas 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 Figura 5 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 como 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 contra explosiones en la admisión si se está operando a potencias relativamente altas. En estas condiciones, variando el esquema de tiempos de inicio de inyección, disminuye esta tendencia.

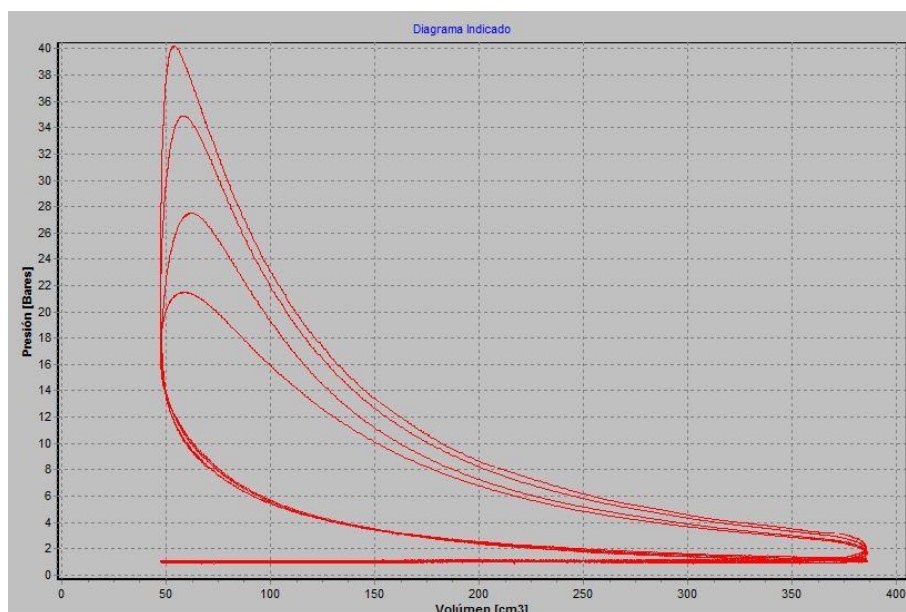


Figura 5 Ciclos medidos operando con diferentes cantidades de hidrógeno (mariposa 100%)

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). 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.

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 Figuras 6 (a) y 6 (b) muestran ciclos operativos con hidrógeno y con nafta respectivamente operando con el avance óptimo para hidrógeno.

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.

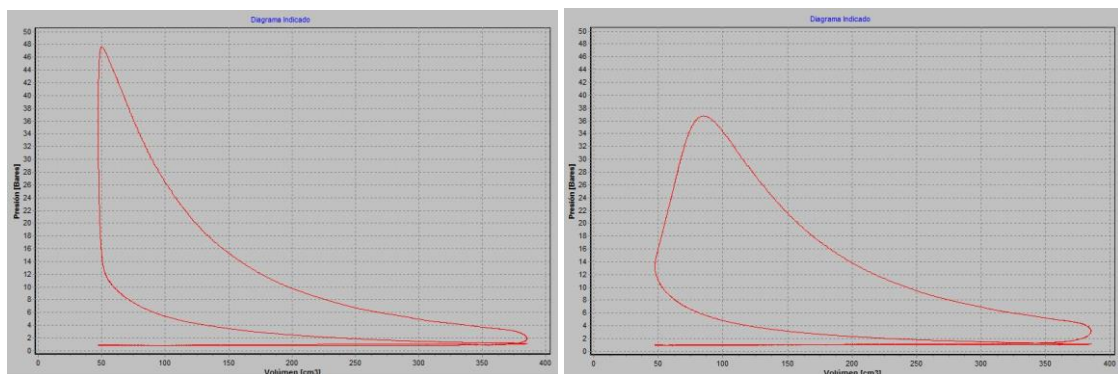


Figura 6 (a) Ciclo medido operando con hidrógeno      Figura 6 (b) Ciclo medido operando con nafta

## 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS 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 las pruebas a realizar con este combustible.
5. Se implementaron pruebas en las que se logró alcanzar altos valores de potencia respecto de los máximos teóricamente alcanzables.

## 8. REFERENCIAS

- [1] R. Hari Ganesh, V. Subramanian, V. Balasubramanian, J.M. Mallikarjuna, A. Ramesh, R.P. Sharma, "Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: An experimental study", Science Direct, Renewable Energy 33 (2008) 1324–1333, 2008.
- [2] Koyanagi, K., Hiruma, M., and Furuhashi, S., "Study on Mechanism of Backfire in Hydrogen Engines," SAE Technical Paper 942035, 1994.
- [3] Heywood, J.B., "Internal combustion engines fundamentals", Mc Graw Hill, 1988.
- [4] Payri, F., Desantes, J.M., "Motores de combustión interna alternativos" Reverté, 2011.
- [5] Daniel Barilá, Luís Bugna, Alberto Torres, Pedro Kolodka, "Desarrollo de una técnica para la obtención del diagrama indicado en motores de combustión interna sin necesidad de referencia angular", Congreso nacional de ingeniería mecánica y eléctrica, Buenos Aires, 2002.