

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA LA INVESTIGACIÓN DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA CON HIDRÓGENO

Patricio Pedreira^{(1)(a)}, Ernesto Gulich^{(1)(b)}, Pedro Orbaiz^{(1)(c)}

Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), Av. Eduardo Madero 399,
Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

(a) ppedreir@itba.edu.ar, (b) egulich@itba.edu.ar, (c) porbaiz@itba.edu.ar

Palabras clave: combustión, hidrógeno, experimental, admisión, transferencia de calor, motor de combustión interna.

Resumen

El desarrollo de motores de combustión interna (MCI) más eficientes, alimentados con combustibles potencialmente limpios como el hidrógeno, se presenta como una posible solución a las problemáticas ocasionadas por las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero generadas por las unidades de potencia convencionales. Sin embargo, para optimizar el diseño de los motores, es necesario profundizar los conocimientos sobre los procesos de transferencia de calor, combustión y turbulencia involucrados en la propagación de llamas premezcladas de aire/hidrógeno. El uso de este último habilita el funcionamiento del MCI con mezcla pobres, esto habilita modificaciones que permitirían mejorar la eficiencia del sistema e inhibir la producción de los distintos óxidos de nitrógeno, debido a la baja temperatura de combustión.

En este trabajo se presenta la metodología experimental utilizada para investigar los procesos de flujo y transferencia de calor en un MCI alimentado con hidrógeno. Dicha experimentación, a su vez, busca ser utilizada para desarrollar y validar modelos de mecánica de fluidos computacional que permitan dar cuenta de los sendos fenómenos que ocurren en simultáneo en la cámara de combustión. Se detallan los aspectos operativos de la instalación, el sistema de control, la instrumentación y el método experimental. Finalmente se muestran resultados del relevamiento de la geometría interna del motor, la flujometría de la admisión y curvas preliminares de presión en el circuito admisión y la cámara de combustión.

1. Introducción

Actualmente existe un crecimiento sostenido en la demanda energética mundial. Los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) suman el 88% de la producción total de energía mundial [1]. Dicha dependencia en los combustibles fósiles, sobre todo a partir de mediados del siglo XX, ha llevado a un crecimiento significativo en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera [1,2]. Existe un consenso general en la comunidad científica mundial de que dicha tendencia es responsable del cambio climático que se registra a nivel global [1,2]. Aproximadamente el 82% de las emisiones de gases de efecto invernadero antropogénicos son el resultado de la generación de energía, por lo tanto es imperativo reducir significativamente las emisiones en este sector.

Desde esta perspectiva, el desarrollo de nuevos motores de combustión interna (MCI) más eficientes alimentados por combustibles intrínsecamente limpios como el hidrógeno se

presenta como una solución viable para la reducción de emisiones contaminantes. La combustión del hidrógeno no implica la participación de moléculas de carbono, siendo el único producto del proceso la formación de vapor de agua. Además, al tener un octanaje relativamente alto y tiempos de combustión cortos, la operación de MCIs podría ser más eficiente.

Sin embargo, existen varios desafíos para la operación de MCIs con hidrógeno. El hidrógeno tiene una temperatura de llama adiabática relativamente alta lo cual estimula la producción de NOx y aumenta las pérdidas de calor del sistema [3]. Si bien existen algunas alternativas para solventar estos problemas, como la operación del motor con exceso de aire para disminuir la temperatura de combustión, todavía existen muchas incógnitas debido a la falta de modelos que reproduzcan satisfactoriamente todos los procesos que ocurren en un MCI.

El proyecto macro dentro del cual se enmarca el trabajo aquí presentado busca desarrollar modelos de mecánica de fluidos computacional que permitan estudiar los flujos de gas en los distintos circuitos de un MCI y particularmente las estructuras de flujo dentro de la cámara de combustión y, los mecanismos de transferencia de calor entre los gases de combustión y las paredes de esta última.

En este trabajo se describe la instalación experimental que será usada para validar los modelos arriba descriptos y se presentan algunos de los resultados preliminares obtenidos.

2. Instalación experimental

En esta sección se describen los diferentes sistemas y componentes del banco de ensayos y se discute la precisión de los instrumentos y los métodos de medición.

2.1. Motor de combustión interna y dinamómetro

El MCI empleado para la investigación es un motor diésel monocilindrico, refrigerado por aire marca Iralvil modelo RV650. Este se transformó de encendido a compresión a encendido a chispa y se adaptó para la operación independiente con gasolina o hidrógeno. La Tabla 1 muestra los parámetros geométricos asociados a la cámara de combustión. La potencia máxima de trabajo continuo del motor original es 9 hp a 2400 rpm.

Tabla 1. Parámetros geométricos de la cámara de combustión.

Diámetro pistón	95 mm
Cilindrada	701.7 cm ³
Relación de compresión	10:1
Carrera	89,1 mm
Largo biela	44,5 mm
Largo cigüeñal	155,5 mm

Para la conversión del motor a ciclo Otto se reemplazó el inyector de diésel por una bujía, se modificó el múltiple de admisión para incluir los inyectores de gasolina e hidrógeno y se colocó una válvula mariposa. A su vez, se instrumentó el sistema con una unidad de control (ECU) MicroSquirt V3. La ECU requiere de información de diversos sensores: posición de mariposa (TPS), presión en el múltiple de admisión (MAP), el conjunto rueda fónica – sensor inductivo para la medición de rpm, sensor inductivo de fase, sensor de oxígeno y sensores de temperatura de aire y aceite. Debido a la constante variación de presión en el múltiple, producto de la operación con un solo cilindro, fue necesario instalar un pulmón compensador entre el múltiple y el MAP. La sonda Uego, encargada de medir la relación relativa de aire y combustible (λ) en el escape, modelo Bosch LSU 4.9, es operada mediante un controlador que maneja el calentamiento y permite seleccionar el rango de salida de tensión vs. λ . La inyección de hidrógeno se realiza con un sistema Prins VSI que opera esclavo al sistema MicroSquirt. Todos los controladores pueden ser operados y modificados de forma remota desde una PC con los programas específicos de cada uno. Además se mecanizaron diferentes pistones, de modo tal de poder variar la relación de compresión del motor hasta un máximo de 17:1, que es el valor original del motor diésel.

El MCI se instaló en un dinamómetro activo de 11 KW conformado por un motor-generador eléctrico, una consola de control WEG y un banco de resistencias refrigerado por aire donde se disipa la potencia generada. La consola WEG permite operar el sistema en distintos regímenes, torque o velocidad constante, y ajustar distintas rampas de aceleración y frenado. También cuenta con sistemas de medición de velocidad, torque y potencia. La Figura 1 muestra la instalación del sistema.

Durante los ensayos se trabajará a régimen constante, controlando los parámetros operativos del motor utilizando principalmente el software de la ECU. Dicho sistema permite la modificación en tiempo real del pulso de inyección, avance del encendido, relación de aire y combustible, etc. Para el caso de operación con hidrógeno, el sistema Prins intercepta la señal de la MicroSquirt y la adapta para el inyector de hidrógeno.

2.2. Sistema de medición y adquisición

La medición de los distintos procesos que ocurren en un MCI representa una alta complejidad debido a la naturaleza transitoria del proceso, el amplio rango de presiones (este incluye tanto presiones elevadas como de vacío), las altas temperaturas de los gases de combustión y escape, y el alto grado de ruido electromagnético presente en el banco de ensayo. A continuación se describen los elementos de medición y las estrategias tomadas para la obtención de datos confiables.

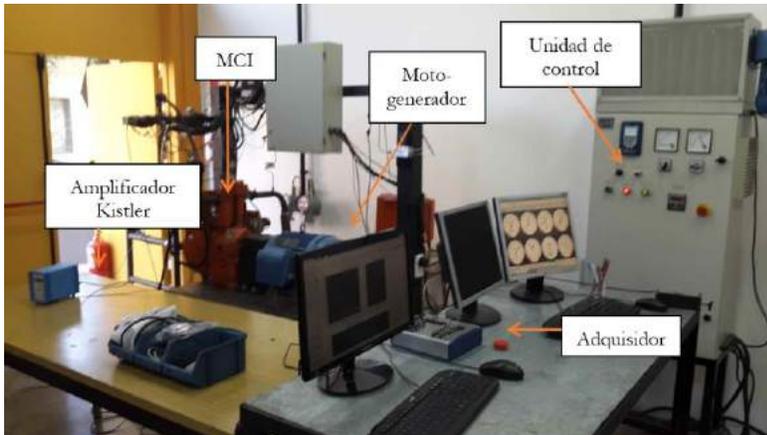


Figura 1. Instalación experimental.

2.2.1. Sensores y digitalización

Para la obtención de datos experimentales que permitan dar cuenta de los fenómenos que ocurren en el MCI y validar el modelo de CFD, se instalaron sensores de temperatura, presión y transferencia de calor en el múltiple de admisión, la cámara de combustión y el múltiple de escape. Tanto en la admisión como en el escape se emplearon sensores de temperatura y presión de tipo industrial. Los sensores de temperatura consisten en termocuplas envainadas que, debido a la inercia térmica de las vainas, solo permiten medir un valor medio de la temperatura. Los sensores de presión son modelo ADZ Nagano - SML, con un tiempo de respuesta menor al milisegundo, permiten la medición de la dinámica de la presión hasta frecuencias de 500 Hz, de acuerdo al teorema de muestreo de Nyquist. En el caso del escape, debido a que el sensor de presión no está preparado para las altas temperaturas de los gases de escape, la conexión se realizó mediante un pequeño serpentín. La precisión de los sensores de presión es ± 5 mbar.

Debido a las condiciones de presión y temperatura que se dan en la cámara de combustión, se instalaron sensores especiales de respuesta rápida ampliamente probados en la investigación de procesos en cámaras de combustión de MCIs [8,9].

La presión dentro de la cámara es medida con un sensor Kistler 6052C con un amplificador Kistler 5011B. Para la medición de temperatura y transferencia de calor se instaló un sensor Vattel HFM-7 con un amplificador Vattel AMP-6. El sensor Vattel es del tipo coaxial, consiste en dos termocuplas separadas por un material cuya conductividad como función de la temperatura es conocida. El tiempo de respuesta es $17\mu\text{s}$ y el error relativo es de 3% y 7% para el flujo de calor y la temperatura, respectivamente. Para la instalación de ambos sensores se modificó la tapa de cilindros (la instalación del sensor Vattel está en curso) de modo que la superficie de ambos sensores sea coincidente con la superficie interna y no tengan incidencia en el flujo dentro de la cámara. Para la medición del flujo másico de hidrógeno se instaló un flujómetro Bronkhorst Hi-Tec F-201AV, cuyo error relativo máximo es del 4%.

Para el análisis de los datos obtenidos de todos los sensores es necesario vincularlos al volumen instantáneo de la cámara de combustión, para poder trazar los diagramas p-V indicados, analizar la incidencia de parámetros operativos como la apertura y cierre de válvulas, el adelanto de chispa, y también validar los modelos de CFD. Para ello se acopló al eje del motor un encoder incremental de 1440 pulsos por vuelta y un canal de indexación de 1 pulso por vuelta. El sistema de adquisición es entonces activado por el encoder. Esto asegura que cada ciclo del motor sea muestreado siempre en los mismos volúmenes de la cámara de combustión, equiespaciados en 0.25° de giro del cigüeñal. La adquisición consiste en una placa externa National Instruments 6361 de 16 bits, 8 canales y frecuencia máxima de muestro de 2 Ms/s. Esta frecuencia se divide por canal, de tal forma que disminuye conforme se asignan más canales, lo que genera un retraso entre la toma de datos del primer sensor y del último sensor, para un determinado intervalo angular. Este retraso se puede estimar de forma conservativa en base a la información provista por National Instruments, tomando los valores indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Retraso de mediciones.

Frecuencia de muestreo Ks/s	2000
Número Sensores	8
Retraso [μ s]	3,50

Con estos valores, a la velocidad máxima de operación de 2400 rpm se obtiene un retraso de 0.0504° entre el primer y último dato lo cual está muy por debajo del el retraso máximo admisible de 0.2° establecido por Heywood para el trazado de diagramas p-V [3]. Vale aclarar que el retraso real durante los ensayos será menor ya que las velocidades de operación serán menores y se operará con menos sensores.

2.2.2. Adquisición y procesamiento de datos

Las operaciones de muestreo descritas en la sección previa son controladas por un programa de análisis de combustión desarrollado por la Universidad de Melbourne, Australia. El programa permite configurar diferentes parámetros de la adquisición como la frecuencia de muestreo, el número de canales activos, filtrado de alto orden, tamaño de muestra, etc. Los ensayos pueden configurarse para una cantidad de ciclos fija, referenciados respecto al PMS al final de la etapa de compresión. Para el análisis de los datos de combustión se utilizarán datos de 300 ciclos continuos. El programa además cuenta con diversos algoritmos para el cálculo en tiempo real de distintos fenómenos a partir de los datos muestreados y de parámetros geométricos relevantes del motor, que son ingresados de forma manual y serán descritos a continuación.

Determinación del punto muerto superior (PMS): debido a que la evolución del flujo en la cámara no es isentrópica, en operación motorizada el punto de máxima presión no se corresponde exactamente con el PMS. El método empleado por el programa consiste en agregar un offset constante y pequeño al ángulo de máximo presión, mediante un análisis del usuario del diagrama p-V.

Fracción de masa quemada: este parámetro puede determinarse a partir del análisis de la curva de presión en el cilindro [3]. Se emplea el esquema desarrollado por Rassweiler y Withrow [4]

Inicio y fin de la combustión: El inicio de la combustión es calculado según la propuesta de Heywood [3] de que el inicio de la combustión puede identificarse como el fin de la región lineal de la curva logarítmica de la presión en función del volumen durante el tiempo de compresión. El fin de la combustión es determinado con el método de Brunt y Emtage [5]

Autoencendido: la detección del autoencendido y su intensidad se realiza a partir del cálculo de la primera derivada de la presión, es decir, a partir de la tasa de aumento de la presión, aplicando un valor límite pasado el cual se identifica un evento de autencendido.

Otros parámetros calculados son la velocidad del motor, la presión media efectiva y el índice politrópico de compresión [3,5].

2.3. Relevamiento de geometría

El programa de mallado que se utilizará para la simulación computacional es el snappyHexMesh del OpenFOAM. El programa, mediante el ajuste de diferentes parámetros, permite el mallado automático de geometrías complejas a partir de un archivo de geometría de extensión .stl. La digitalización de la geometría se realizó mediante el relevamiento manual y/o electrónico de los distintos componentes que afectan el flujo en todo el circuito del motor. El relevamiento de las geometrías del múltiple de admisión, mariposa, cámara de combustión y múltiple de admisión se realizó de forma manual y se digitalizó utilizando CATIA V5. La Figura 2 muestra algunas de las geometrías digitalizadas.

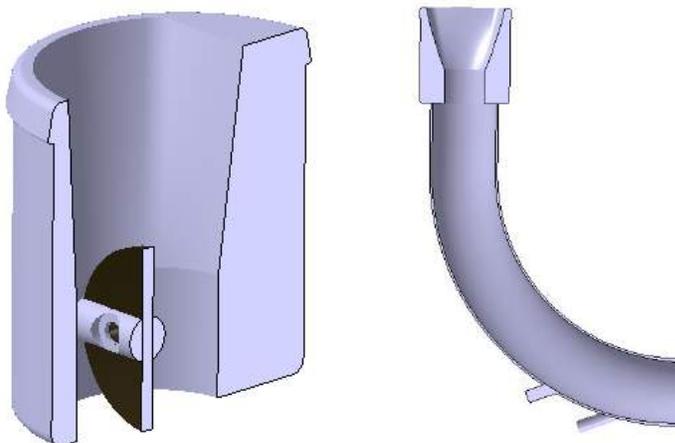


Figura 2. Mariposa y Múltiple de admisión (con mariposa).

Los conductos de admisión y escape de la tapa de cilindros son geometrías complejas de difícil acceso por lo que se procedió a realizar un molde de ambos conductos en caucho de siliconas. Este material es un elastómero de dos componentes líquidos que vulcaniza a temperatura ambiente y por su fluidez da un molde con un muy buen detalle. Una vez curado, la elevada elasticidad del material permitió la extracción del molde sin deformación. Luego, los moldes fueron relevados utilizando un brazo medidor FARO Edge, que genera una nube de puntos que representa la superficie del molde, con una precisión máxima de 0.024mm. La precisión real de la medición es menor debido a la manipulación del brazo, la deformación elástica del molde debido a su propio peso y pequeñas irregularidades en la superficie del molde. Sin embargo, la precisión de las mediciones se consideró suficiente para la simulación computacional. La nube de puntos fue pre-procesada con el software Geomagic y luego procesada con CATIA para obtener el .stl requerido por el software de mallado. La Figura 4 muestra el molde y su consecuente digitalización para el canal de admisión. En todos los casos, siempre que fuera posible, las mediciones del brazo fueron cotejadas con mediciones de calibre y micrómetro. Las válvulas de admisión y escape también fueron relevadas con el brazo Faro. En la Figura 5 se muestra toda la digitalización de la geometría del motor.



Figura 4. Molde de silicona y digitalización del canal de admisión de la tapa de cilindros.

3. Resultados preliminares y análisis

Con la digitalización de la geometría finalizada, se procedió a ensayos de flujometría tanto en el circuito de admisión como en el de escape a modo de generar la base de datos necesaria para la validación de la metodología de malla y de los modelos computacionales del flujo junto a las técnicas de discretización.

Por otro lado, se procedió a relevar la evolución de presión en la cámara de combustión modificando el tiempo de encendido y otras variables de control. Esto permitió poner a punto el sistema de adquisición detallado en las secciones previas.

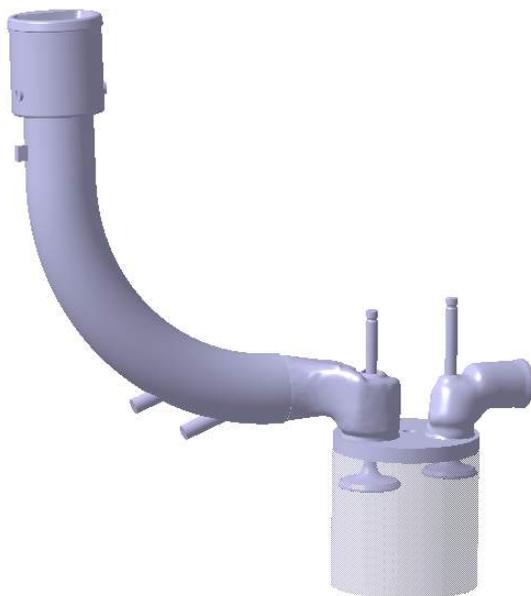


Figura 5. Geometría completa del motor.

3.1. Caracterización de la admisión

Los ensayos se realizaron en un flujómetro Superflow SF-600E. Durante los mismos se fija una presión manométrica, positiva o negativa, regulando el caudal que circula a través del elemento a ensayar. Para optimizar la regulación, el flujómetro requiere ser configurado manualmente a través de diferentes válvulas y comandos. De este modo, el error en la medición del caudal depende del rango configurado, según se consigna en la Tabla 3.

Tabla 3. Error Flujómetro.

Rango máximo [10 ⁻³ m ³ /s]	Error [10 ⁻³ m ³ /s]
18	0,108
35	0,21
70	0,42
600	3,6
450	2,7
600	3,6

Las mediciones de presión y caudal fueron complementadas con información de una estación meteorológica Luft, de modo de poder obtener las propiedades de transporte, viscosidad y densidad, del aire corregidas por presión, humedad relativa y temperatura. Las propiedades del aire fueron calculadas con correlaciones de aire húmedo [6]. Durante los ensayos, que se realizaron en distintos momentos del mes, se registraron mayormente variaciones en la humedad ambiente (46% a 76%) las cuales derivaron en variaciones en los resultados del 12.3% y 3.3% para la densidad y viscosidad respectivamente. El error de los valores medidos es ± 0.05 kPa, ± 2 % y ± 0.5 °C.

Primero se realizó la flujometría del canal de admisión regulando la apertura de la válvula con un mecanismo que actuaba sobre el vástago mediante un tornillo de paso fino. La apertura se midió con un comparador apoyado normalmente a la superficie de la válvula, lo que permitió medir el desplazamiento con una precisión de 0.025 mm. En todos los casos ensayados no se registró que el flujo alterara la posición de la válvula.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos. En esta se observa que el caudal máximo es alcanzado con una apertura de válvula de 10 mm. El rango de número de Reynolds en los ensayos fue de $2.7 \cdot 10^4$ a $9.6 \cdot 10^4$. Es decir, que si se toma como intervalo de transición laminar-turbulento $2300 < Re < 5000$ [7], el flujo en todos los ensayos fue turbulento. +

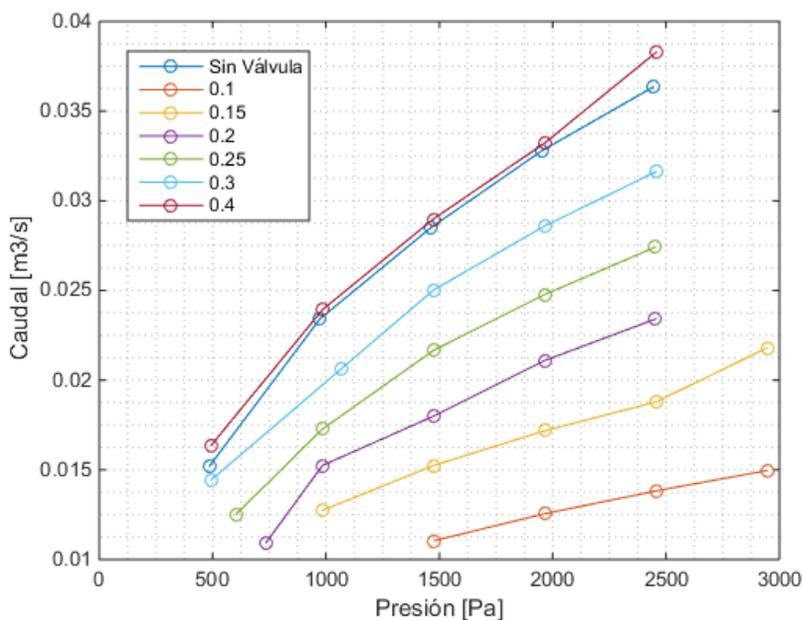


Figura 6. Flujometría de tapa de cilindros.

Luego se procedió a calcular el coeficiente de descarga del flujo, C_D . Este puede expresarse como el cociente entre el caudal medido y el caudal teórico, estimando este último a partir de la expresión ideal de Bernoulli, Ecuación 1,

$$Q_{teo} = A \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

donde Q_{teo} es el caudal teórico, A el área del conducto (tomada aquí como el valor medio), Δp la caída de presión y ρ la densidad del medio. Los resultados, detallados en la Figura 7, muestran que el C_D depende fuertemente del grado de apertura de la válvula, variando poco en el rango de Reynolds ensayado para una apertura dada, según se observa en la varianza representada por las barras en la figura.

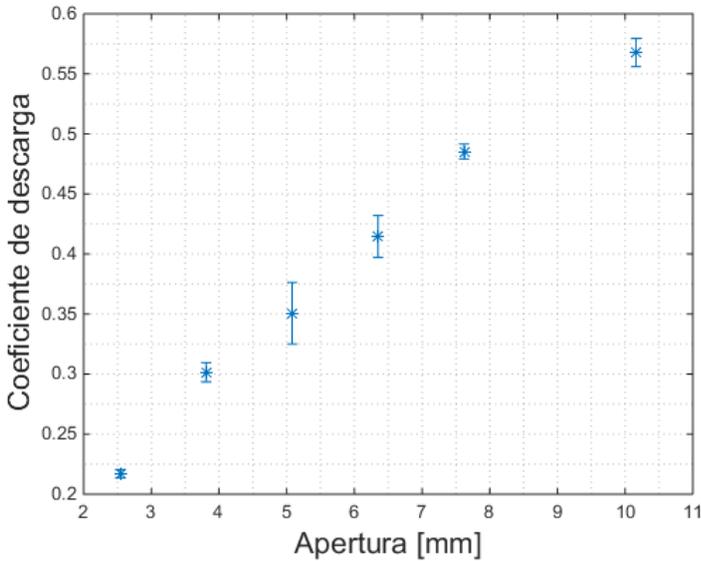


Figura 7. Coeficiente de descarga de la tapa de cilindros.

La flujometría del múltiple de admisión se realizó con y sin filtro de aire a modo de determinar la influencia de este último en el rango de operación del sistema dada la no disponibilidad de un sensor de presión aguas arriba de la mariposa. Para todos los ensayos se fijó una presión de aspiración de 10 kPa. La Figura 8 muestra las curvas características de flujo para distintos grados de apertura de la mariposa. En esta se observa que con una apertura de 75° el flujo se hace independiente de la mariposa para ambos casos, siendo el flujo final 20% mayor para el sistema sin filtro. No obstante, para flujos menores a 0.025 m³/s no se observa ninguna disminución del flujo debido al filtro, con lo que se lo puede suprimir del modelo computacional siempre que se satisfaga esa condición.

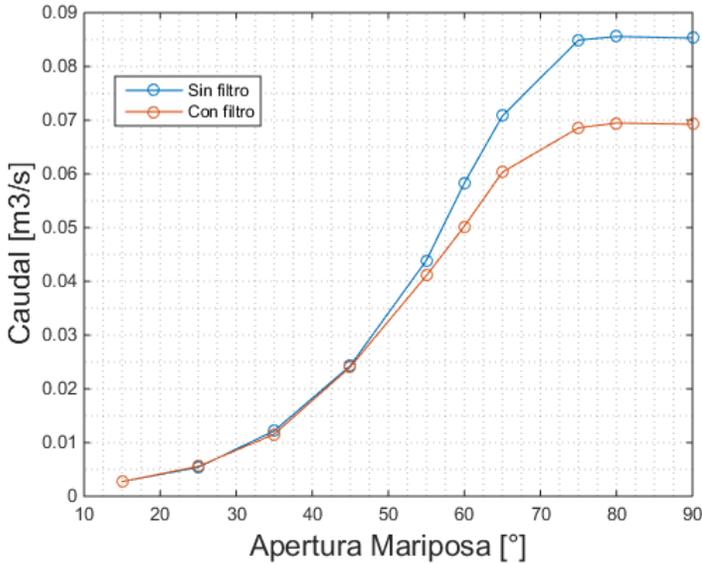


Figura 8. Flujo múltiple de admisión.

Heywood [3] aproxima el flujo de aire que entra a la cámara de combustión usando la siguiente expresión

$$Q = \frac{0.5 N}{60} P * VE * V_D \quad (2)$$

donde VE es la eficiencia volumétrica, V_D es el volumen desplazado en el cilindro, P la presión de aspiración y N la velocidad del motor. Tomando la presión de aspiración como la atmosférica, VE igual a uno y la velocidad máxima del motor, 2400 rpm, se tiene que para el motor ensayado el caudal máximo aspirado es de 0.013 m³/s. Dicho valor es cercano a la mitad del valor de caudal para el cual comienza a apreciarse la presencia del filtro por lo cual se considera válido eliminar dicho componente de todas las simulaciones a realizar.

En cuanto a las características del circuito de admisión completo, se relevaron 50 ciclos de la evolución de la presión en la admisión para distintas aperturas de mariposa con el MCI motorizado a diferentes velocidades. La Figura 9 muestra el ciclo promedio, el de presión máxima y el de presión mínima para el motor operando a 600 rpm. Se puede apreciar que las tres son equivalentes, lo cual establece la alta repetitividad del sistema.

Previo al análisis de los resultados se realizaron diversas verificaciones para comprobar la calidad de las mediciones. Se verificó en todos los casos que el valor medio de la presión sea próximo al reportado por el MAP, que se encuentra conectado a la admisión mediante un pulmón compensador. Luego se analizó las componentes frecuenciales de las señales mediante un algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (FFT) implementado en Matlab. En todos los casos se registró que la frecuencia principal es la correspondiente a la frecuencia de apertura de la válvula de admisión, que es la mitad de la frecuencia de giro del motor. La Figura 10 muestra los resultados para los distintos regímenes. Los picos

secundarios se corresponden exactamente con los armónicos de la frecuencia principal. Dado que el muestreo se realiza a una velocidad muy superior a la del tiempo de respuesta del sensor de presión (14.4, 21.6 y 28.8 kHz a 600, 900 y 1200 rpm, respectivamente), este limita la frecuencia de análisis a 500 Hz. Por debajo de esa frecuencia no se observó ninguna componente oscilatoria adicional.

Las curvas de presión obtenidas se graficaron en la Figura 11. Para los casos con mariposa totalmente abierta (WOT) se observa que la presión en el múltiple primero desciende monótonicamente y luego comienza a recuperarse antes del cierre de la válvula de admisión (a 175°). Esto indica que el flujo de aire que ingresa al múltiple a través del conjunto mariposa-filtro es mayor al que circula hacia el interior del cilindro. Las presiones que se obtienen en todos los casos, disminuyen con el aumento de la velocidad, lo que significa que aumenta el caudal aspirado del motor, como fue indicado en la Ecuación 2. Conforme se cierra la mariposa, la presión en el múltiple comienza a disminuir producto de la caída de presión que genera el estrangulamiento. Ocurre un cambio cualitativo en la primera parte de la aspiración, el descenso deja de ser monótono al tener un pico previo al punto de mínima presión. El pico se retrasa conforme aumenta la velocidad del motor. Luego del pico, la presión sigue descendiendo hasta llegar a un valor aproximadamente constante, lo que implica que los flujos de entrada y salida del múltiple están balanceados. Con el cierre de la válvula de admisión la presión comienza a subir.

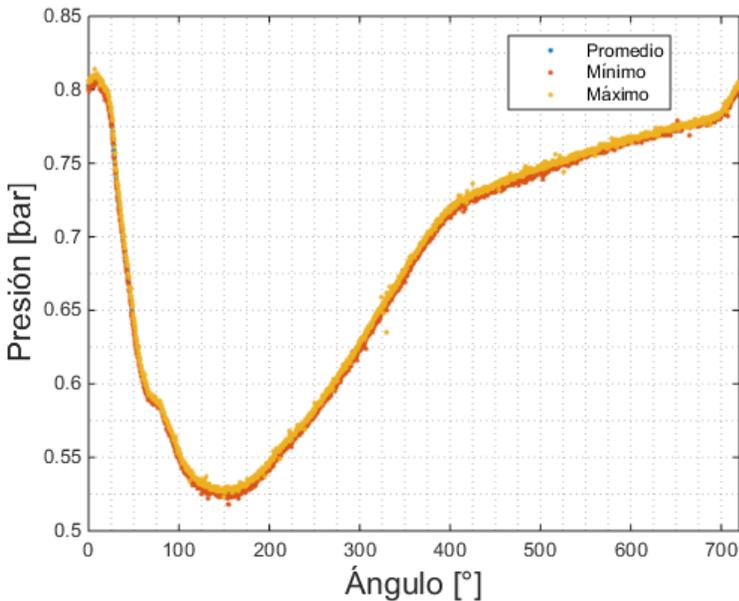


Figura 9. Curvas de presión media, máxima y mínima en el múltiple de admisión.

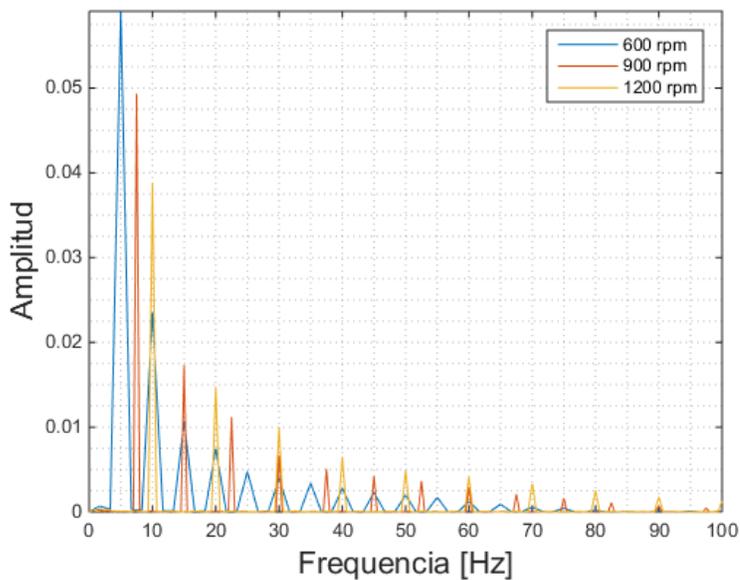


Figura 10. Análisis frecuencial de la señal de presión en el múltiple de admisión.

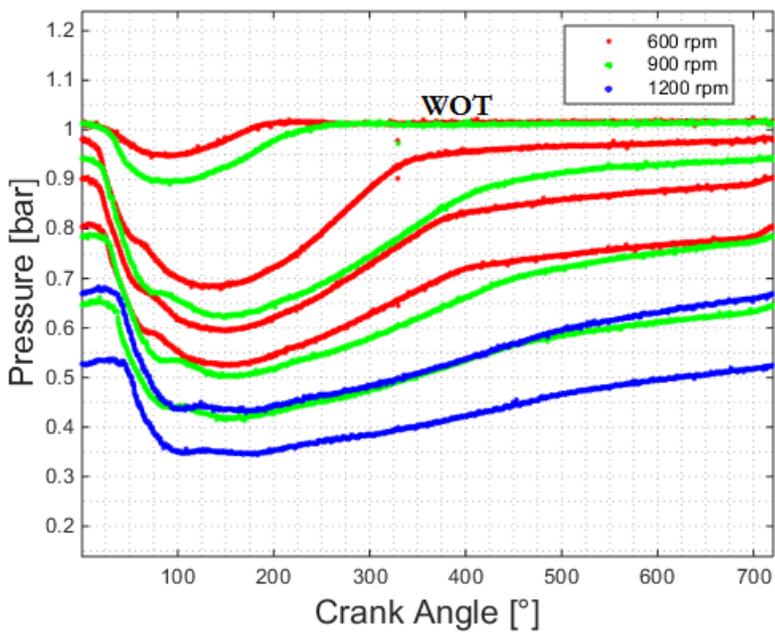


Figura 11. Presión en el múltiple en distintos regimenes.

3.2. Cámara de combustión

Para calibrar el sistema de adquisición de curvas de presión en el interior de la cámara de combustión se operó el motor con gasolina, fijando una presión media en el múltiplo de 60 kPa, una velocidad de giro de 900 rpm y ajustando el tiempo de inyección para operar con $\lambda \approx 1$. En esas condiciones, se modificó en tiempo real el ángulo de avance de encendido. Dado que la duración del ensayo fue corta, los datos mostrados no están termalizados. La Figura 12 muestra un ensamble de los diagramas p-V instantáneos para los distintos avances. El ciclo que da el trabajo mínimo se obtuvo con un avance de 20° y el de trabajo máximo con un avance de 10° , no habiendo diferencias apreciables en la fase de admisión y escape. Esto ocurre porque la combustión y el consecuente ascenso de la presión no son procesos instantáneos y están asociados no solo a las propiedades de la mezcla sino también a las condiciones de operación del motor. Entonces si la combustión se retrasa respecto al PMS, se reduce la presión máxima en el cilindro y el trabajo cedido por los gases al pistón en la etapa de expansión disminuye. En cambio, si la combustión es prematura aumenta el trabajo realizado por el pistón a los gases. En los ensayos, según se observa en la Figura 12, el avance de encendido en exceso tuvo el efecto de reducir la presión máxima en la cámara, al liberarse la mayor parte de la energía de combustión en un volumen de cámara mayor al del PMS.

4. Trabajos futuros

Lo detallado durante este ensayo corresponde a un trabajo de modelado y validación más amplio que apunta a entender en profundidad los mecanismos de transferencia de calor y las estructura del flujo turbulento pertinentes a todo el ciclo de potencia de un motor 4 tiempos alimentado con hidrógeno. La instalación experimental detallada en las secciones previas contempla las herramientas necesarias para determinar los diferentes aspectos y parámetros relacionados con el comportamiento de los gases dentro del motor. Estos incluyen entre otros, el coeficiente de convección entre los gases de escape y las paredes de la cámara de combustión, inferir la escala de los vórtices y eddies del flujo turbulento al igual que su intensidad, la velocidad de propagación de llama, etc. Se buscará mediante la realización de ensayos paramétricos determinar el comportamiento de estos últimos a modo de poder usar los datos obtenidos para posteriormente corroborar el modelo de CFD desarrollado y así generar herramientas que permitan facilitar el desarrollo de nuevas geometrías de cámara que estén optimizadas para el combustible en cuestión.

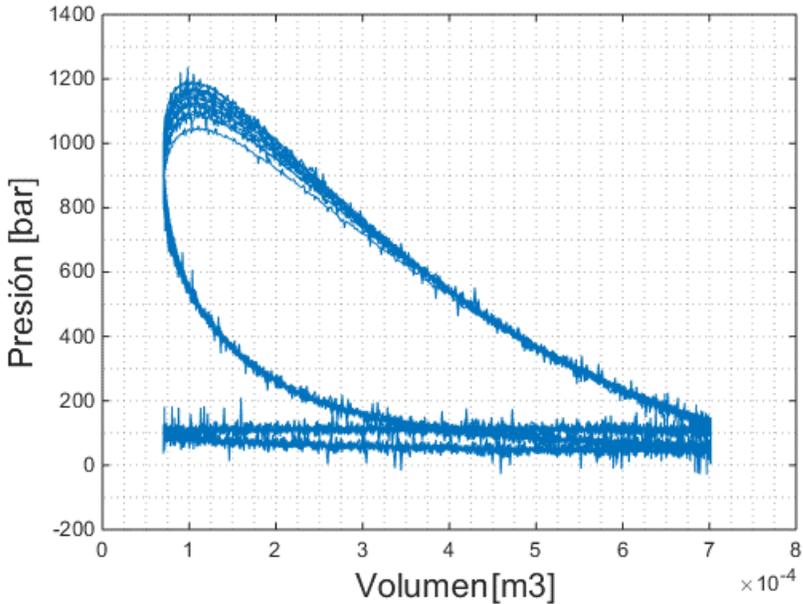


Figura 12. Presión en la cámara para distintos ángulos de avance.

5. Referencias

- [1] "Statistical review of world energy", BP, Technical report, British Petroleum, 2011.
- [2] "CO₂ emissions from fuel combustion", IEA, Technical report, International Energy Agency, 2009.
- [3] Heywood, J. "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
- [4] Rassweiler, G.M. & Withrow, L., "Motion pictures of engine flames correlated with pressure cards", SAE Transactions, 1938.
- [5] Brunt, M.F.J., & Ematage, A.L., "Evaluation of burn rate routines and analysis errors", SAE paper, 1997.
- [6] Morvay, Z. & Gvozdenac, D., "Applied industrial energy and environmental management", Wiley-IEEE Press, 2008]
- [7] White, F. "Mecánica de fluidos", McGraw-Hill, 2004.
- [8] Demuyck, J., Raes, N., Zuliani, M., De Paepe, M., Sierens, R. & Verhlest, S., "Local heat flux measurements in a hydrogen and methane spark ignition engine with a thermopile sensor".
- [9] Verhelst, S., Maesschalck, P., Rombaut, N. & Sierens, R., "Increasing the power output of hydrogen internal combustion engines by means of supercharging and exhaust gas recirculation", International Journal of Hydrogen Energy, 2009.

