



# 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

## DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA PARA INYECCIÓN DIRECTA DE GASES, EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE MOTORES

Federico N. Ruffinelli<sup>1</sup>, M. Florencia Sánchez<sup>2</sup>, M. Hernán Cufre<sup>\*3</sup> y J. Ricardo Lauretta<sup>4</sup>

<sup>1, 2, \*3, 4</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Buenos Aires  
Av. Eduardo Madero 399 Ciudad Autónoma de Buenos Aires Argentina

Correo-e: [ruffine@itba.edu.ar](mailto:ruffine@itba.edu.ar), [mariasan@itba.edu.ar](mailto:mariasan@itba.edu.ar), [hcufreba@itba.edu.ar](mailto:hcufreba@itba.edu.ar) y [rlaure@itba.edu.ar](mailto:rlaure@itba.edu.ar)

### RESUMEN

La utilización de hidrogeno en motores de combustión interna es uno de los caminos hacia la implementación de sistemas energéticos no contaminantes. Para lograrlo es necesario el desarrollo de dispositivos apropiados para la alimentación de hidrógeno en los motores. En este sentido, la inyección directa en la cámara de combustión es una vía prometedora. En este trabajo se ensayó un inyector de gas, capaz de operar directamente en la cámara de combustión de un motor. El inyector utilizado fue desarrollado a partir de uno perteneciente a un sistema Common Rail de un motor Diesel comercial. Los resultados obtenidos muestran que se puede controlar la inyección de gas con presiones de alimentación de hasta 100 bar y tiempos de pulsado de 1,6 ms aproximadamente y que el sistema posee buena estanqueidad. La posibilidad de realizar este tipo de adaptaciones allana el camino hacia el desarrollo de motores con sistemas de inyección directa de hidrógeno en la cámara de combustión.

**Palabras Claves:** *Inyección directa de gases, combustión, hidrogeno.*



# 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

## 1. INTRODUCCIÓN

Los motores alternativos de combustión interna, son la tecnología predominante en ciclos de potencia de pequeña y mediana escala. Estos, en su mayoría, utilizan como combustible diferentes hidrocarburos, como naftas, gasoil, alcoholes, biodiesel y metano. La combustión de estos hidrocarburos genera emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>n</sub>C<sub>m</sub> y NO<sub>x</sub>, los cuales contribuyen con el efecto invernadero y son perjudiciales para el medio ambiente y la salud [1].

Actualmente se investiga intensamente sobre el mejor aprovechamiento de las energías renovables, a partir de su almacenamiento en hidrógeno. Este, al combinarse con el oxígeno del aire, libera energía térmica y produce solo vapor de agua y concentraciones variables de NO<sub>x</sub>. Dependiendo de la manera en que se realice la combustión, las emisiones de NO<sub>x</sub> en los motores alimentados a hidrogeno pueden ser un orden de magnitud menor que en los motores de gasolina [2]. Todo esto hace que el hidrógeno sea una alternativa interesante para su aplicación en motores alternativos de combustión interna.

Sin embargo, efectos como el preencendido de la mezcla de hidrógeno y aire en el múltiple de admisión, detonaciones en las etapas de compresión y combustión, y el consecuente aumento en las emisiones de NO<sub>x</sub> son algunos de los problemas que limitan la aplicación del hidrógeno.

Una solución para estos problemas, es la inyección directa del hidrógeno en la cámara de combustión. En efecto, al dosificar el ingreso de Hidrogeno de manera controlada, se eliminan los problemas de preencendido y las detonaciones [3]. Además el control del proceso de combustión minimiza la producción de NO<sub>x</sub>.

Actualmente no existen inyectores comerciales para gases, capaces de operar directamente en la cámara de combustión de un motor. Sin embargo hay trabajos de investigación en los que se utilizan dispositivos para inyección de hidrogeno especialmente desarrollados para este fin [4]. En este trabajo se estudia la factibilidad de desarrollar un inyector para gases, partiendo de un inyector comercial de gasoil, perteneciente a un sistema Common Rail (C.R.D.).

El trabajo se organizó como sigue:

- Se sometió el inyector modificado a un ensayo de estanqueidad. Este se realizó con aire y nitrógeno.



- Se analizó la respuesta del inyector con distintas presiones de alimentación, utilizando nitrógeno hasta 100 bar. Manteniendo un Duty Cycle constante, se varió la frecuencia de inyección. Luego manteniendo una misma frecuencia, se varió el Duty Cycle.
- Se realizaron ensayos inyectando con contra presiones variables de hasta 6 bar, manteniendo la señal de pulsado.

## 2. DESARROLLO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN

### 2.1 Modificación del inyector.

Para los ensayos del presente trabajo se utilizó un inyector Common Rail Diesel CRD de electroválvula tipo solenoide (Inyector Bosch N° 0445110120), que fue modificado para poder trabajar con gas. El inyector seleccionado tiene una presión de trabajo de 2000 bar. Estos inyectores se pueden dividir en 4 secciones: solenoide, válvula de Pilotaje, aguja y tobera. Esto se puede observar en la Figura 1.

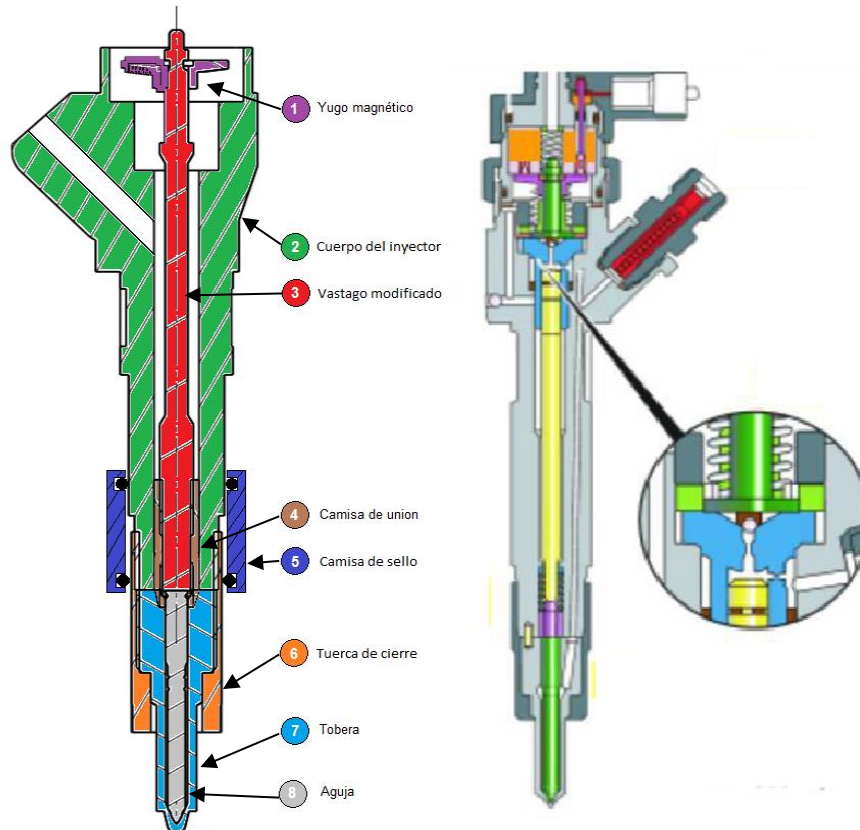


Figura 1 Izquierda: Esquema del inyector modificado. Derecha: Esquema inyector original, con detalle en la válvula de pilotaje.



# 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

Se modificó tanto el cuerpo como la tobera del inyector para obtener un sistema de accionamiento electromecánico directo sobre la aguja del mismo. La aguja y su asiento constituyen la válvula propiamente dicha, la que se encuentra en el extremo inferior del inyector y que se ubica dentro de la cámara de combustión, cuando el inyector es instalado en el motor.

En la modificación realizada, el cierre de la aguja contra el asiento se logró gracias a la diferencia que existe entre la presión antes y después del inyector. Además se utilizó un resorte para mantener presionada la aguja contra el asiento aún en ausencia de dicha diferencia de presiones, lo cual estabilizó el funcionamiento del sistema.

La apertura del paso de gas se produce cuando la bobina recibe el pulso de corriente eléctrica que atrae la aguja y provoca que se desplace una cierta carrera. La carrera de la aguja, " $h_a$ ", se ajusta con arandelas de calibración ubicadas entre el cuerpo y la cápsula que contiene a la bobina. La variable  $h_a$  se utilizó para ajustar el caudal inyectado. El inyector modificado fue sellado completamente utilizando una camisa con o'rings para evitar fugas de gas entre el cuerpo y la tobera. Finalmente también se selló el retorno de combustible del inyector.

Las modificaciones en la tobera y la aguja fueron mínimas para no afectar su funcionamiento. La aguja se conectó con el vástago mediante una camisa de unión, lo que produce que se comporte como una a pieza única. Se construyeron dos vástagos, uno realizado en aluminio de 22.41gr (Vástago A), y otro realizado en acero con un diseño más esbelto y de 18.04gr (Vástago B) Figura 2.

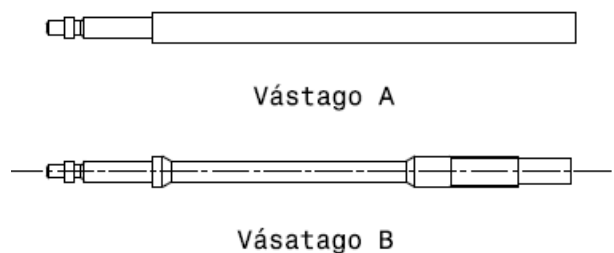


Figura 2 Arriba: Vástago A de mayor masa realizado en aluminio.  
Abajo: Vástago B realizado en acero.

## 2.2 Electrónica de pulsado

Además de las modificaciones mecánicas realizadas al inyector, se diseñó un sistema de control electrónico que envía una señal de tipo peak and hold. Para lograrlo se desarrolló un driver de potencia basado en un transistor tipo MOSFET accionado por un sistema push pull de transistores



# 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

bipolares. El sistema de potencia se encuentra optoacoplado respecto de la señal de control del microprocesador (Se utilizó Arduino) encargado de generar el pulso de control. Un arreglo RC limita la corriente de la bobina en el periodo de retención (hold) y entrega un pico de corriente (peak) necesario para el despegue inicial de la aguja.

La señal entregada por el microprocesador determina la Frecuencia y el "Duty cycle" del inyector.

### 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con nitrógeno a alta presión (150 Bar), se presurizó un pulmón intermedio Figura 3 y Figura 4, cuya presión se reguló mediante una válvula de carga y una de descarga al ambiente. El objetivo del pulmón es estabilizar la presión del gas a diferentes valores predeterminados, para alimentar el inyector modificado. Un manómetro en el pulmón permite conocer la presión  $P_i$  (Manómetro 1).

En el ensayo 1, se realizaron mediciones con valores de  $P_i$  entre 10 y 100 bar manométricos. Se inyectó nitrógeno proveniente del pulmón a través de un conducto de longitud suficiente para eliminar efectos pulsantes en el caudal  $Q$ . Éste fue medido por un caudalímetro de hilo caliente (ALICAT M50) cuya salida se encuentra a presión ambiente  $P_0$ , Figura 3. Se estudió la respuesta del inyector frente a distintos Duty cycle, frecuencia y presiones de inyección.

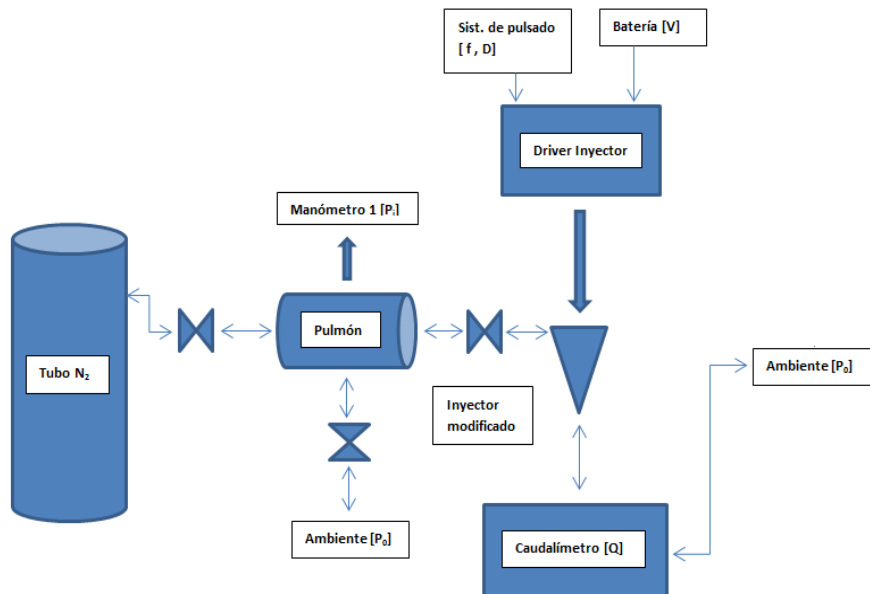


Figura 3 Esquema experimental adoptado para el Ensayo 1.



En el ensayo 2, se inyectó gas contra distintas presiones, para lo cual se agregó, a la salida del caudalímetro un tanque previamente presurizado Figura 4. Un manómetro (Manómetro 2) en este tanque permite conocer la contrapresión  $P_e$ , que se regula mediante una válvula de carga y una de descarga al ambiente. Durante este trabajo se realizaron mediciones con  $P_e$  entre 1 y 10 bar manométricos. La presión de inyección  $P_i$ , duty cycle y frecuencia se mantuvieron constantes.

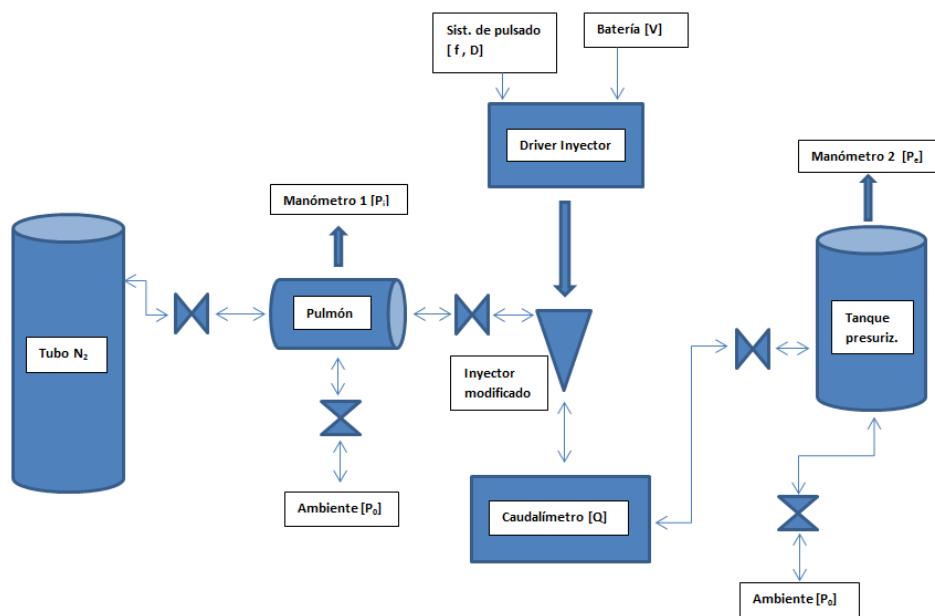


Figura 4 Esquema experimental adoptado para el Ensayo 2.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Variación de Caudal ( $Q$ ) con distintos Duty Cycle ( $D$ ) y Presión de Inyección ( $P_i$ ) vs Presión Ambiente ( $P_0$ ).

En estos ensayos se mantuvo la frecuencia de pulsado ( $f$ ) constante en 16.6 Hz y se realizaron mediciones de  $Q$  para distintos valores de  $P_i$ . Las mediciones se hicieron para los siguientes valores de  $D$ : 4.7 %, 9.7 % y 14.4 %. Los resultados se muestran en la Figura 5.a.

Se observa un aumento de  $Q$  al incrementar  $P_i$ , así como al aumentar  $D$ . Cuando la presión  $P_i$  se acerca a 95 bar, se aprecia que  $Q$  comienza a decrecer. Este comportamiento es atribuible a una falta de fuerza electromagnética del solenoide para abrir el inyector cuando las presiones alcanzan



# 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

estos valores. Es posible corregir este efecto aumentando la corriente a través de la bobina. Sin embargo la utilización de mayores corrientes compromete la integridad del solenoide utilizado en este experimento.

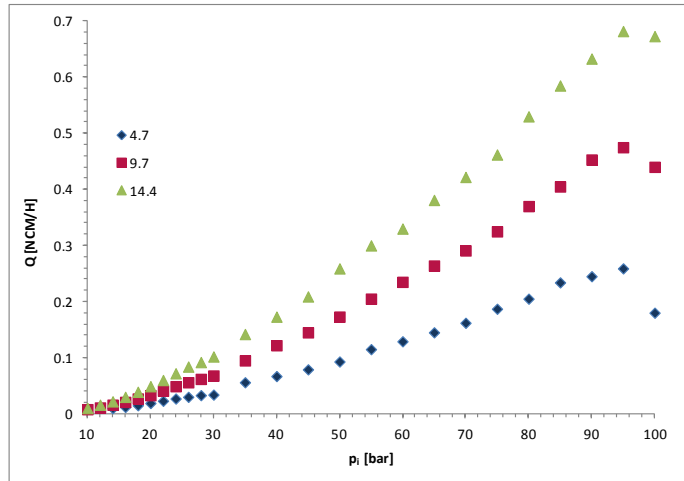


Figura 5.a Caudal  $Q$  para distintas presiones  $P_i$  a distintos Duty cycle

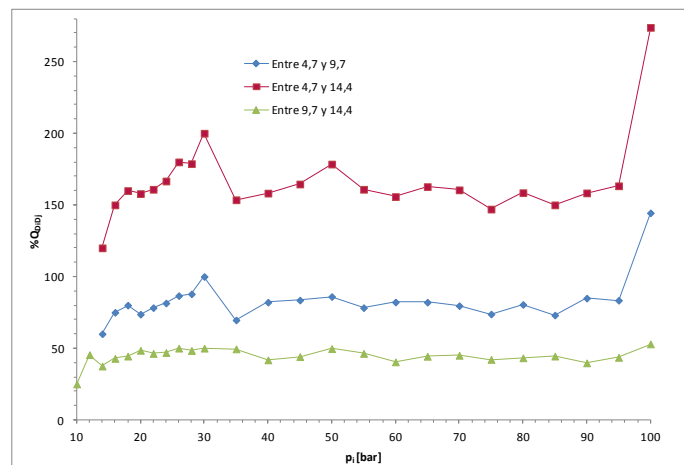


Figura 5.b Variación relativa porcentual de caudal  $Q$  entre distintos Duty cycle

En la Figura 5.b se puede ver la variación relativa porcentual del caudal, calculada según la Ecuación (1).

$$\%Q_{D_i D_j} = \frac{Q_{D_i} - Q_{D_j}}{Q_{D_j}} \times 100 \quad (1)$$



# 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

Siendo  $Q_{Di}$  el caudal correspondiente al duty  $i$  y  $Q_{Dj}$  el caudal correspondiente al duty  $j$ . Se puede observar que un aumento porcentual fijo en  $D$ , determina una variación relativa porcentual de  $Q$ , prácticamente independiente de  $P_i$ .

Se realizaron mediciones utilizando los vástagos A y B. En la Figura 6, se observa que las tendencias de  $Q$  son similares para ambos vástagos. Sin embargo, el vástago B, de menor masa alcanza caudales mayores.

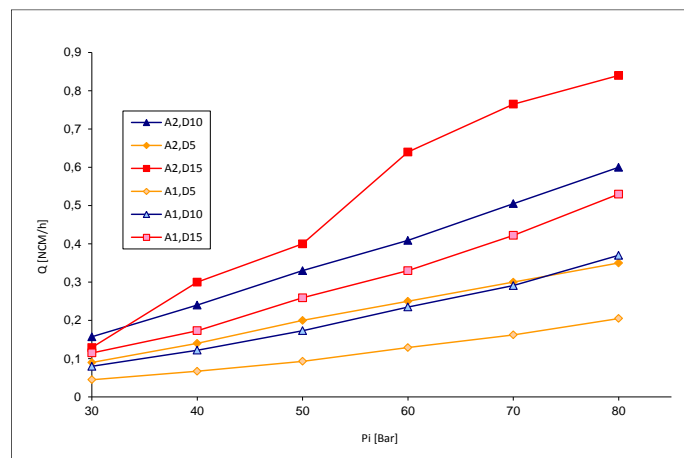


Figura 6 Caudal  $Q$  para distintas presiones  $P_i$ . Se utilizaron distintos vástagos A (A1) y B (A2) con  $D$  5%, 10% y 15% para cada una. Se ven tendencias similares entre distintos vástagos.

## 4.2 Variación de Caudal ( $Q$ ) con distintas Frecuencias ( $f$ ) y Presión de Inyección ( $P_i$ ) vs Presión Ambiente ( $P_0$ ).

Se fijó Duty cycle en 9,7% y se utilizaron  $f$  de 16.7, 25.7 y 30 Hz. Se observaron valores de  $Q$  similares para las distintas frecuencias de pulsado. Se pueden ver los resultados en la Figura 7.

Los resultados muestran que el tiempo promedio de apertura del inyector está dado por  $D$ , siendo independiente de la frecuencia a la que es pulsado. El caudal promedio  $Q$  es aproximadamente igual para todos los casos. De estos se puede inferir que la duración de los transitorios de apertura y cierre es despreciable.



# 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

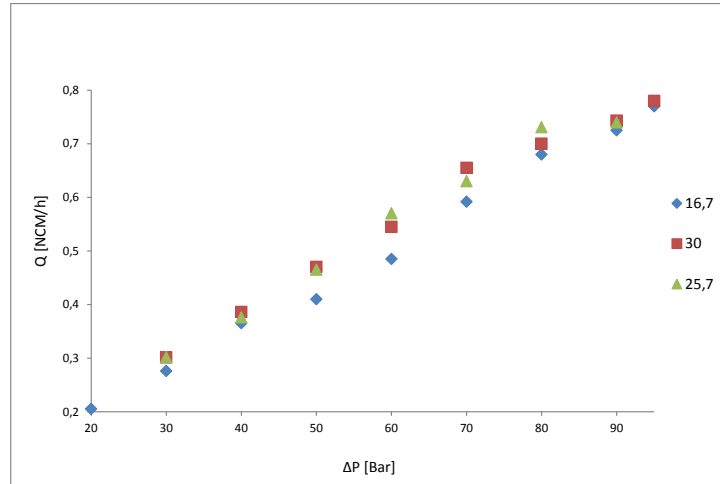


Figura 7 Caudal Q a distintas presiones  $P_i$ . Las mediciones se hicieron para 16.7, 25.7 y 30 Hz con D 9.7%. Se observan valores similares de Q para las distintas f.

## 4.2 Variación del Caudal (Q) con distintas Presiones y Contra Presiones de Inyección ( $P_i$ y $P_e$ ) a Frecuencia (f) y Duty Cycle (D) constantes.

Se realizaron mediciones de Q para distintas  $P_i$  con f de 25.7 Hz y D de 10%. Se aumentó  $P_e$  gradualmente desde  $P_0$  hasta 6 bar con intervalos de 2 bar. En la Figura 8 se observa que el caudal Q resulta poco dependiente de la contrapresión y solo se modifica frente a cambios de  $P_i$ . Este comportamiento es propio del flujo crítico, e indica que en las condiciones de este experimento, el gas adquiere la velocidad del sonido en la garganta de las toberas.

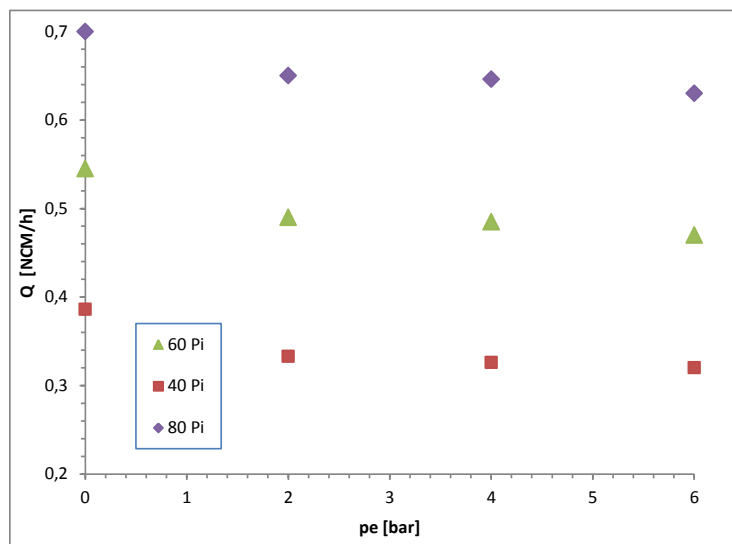


Figura 8 Caudal Q para distintas presiones  $P_i$  manométricas. Mediciones con D de 9.7%, f de 25.7Hz y contra  $P_0$

Si se fija  $P_i$  en más de 40 bar,  $Q$  varía entonces solo con  $D$ . Esta es una característica buscada en sistemas para inyección de gases, ya que facilita el control de la masa de aire inyectada [5].

## 5. CONCLUSIONES

Es viable la inyección directa controlada de gases en cámaras de presión variable modificando inyectores C.R.D.

Los inyectores C.R.D. ofrecen una plataforma apropiada para realizar numerosas modificaciones y ensayos que podrán servir para poner a punto sistemas de inyección directa gases en la cámara de combustión. Se demostró que es posible controlar el caudal de gas inyectado con presiones de inyección de hasta 100 bares, contra presiones de más de 6 bar.

El caudal se puede controlar variando el Duty cycle  $D$ . En el inyector utilizado en este trabajo, se conservó la tobera original, pero la masa de gas inyectado en cada pulso podría ser ajustada a la requerida por el motor aumentando el número y diámetro de los orificios de la tobera. Se observó que el sistema es estable con una señal de pulsado con frecuencias entre 16 y 30Hz, correspondientes a 1920rpm y 3600rpm respectivamente, con Duty cycle entre 4.7% y 14.4%.

Se comprobó que la tobera de un inyector C.R.D genera flujo crítico del gas inyectado. Esto independiza el caudal de las presiones variables de la cámara en la que se realicen las inyecciones. Como consecuencia, fijando un valor adecuado de  $D$  se puede obtener un sistema estable, capaz de operar con un amplio rango de contrapresiones.

## 6. TRABAJOS FUTUROS

Como continuación del presente trabajo, se evaluarán los efectos de la temperatura y lubricación en el sistema. Para lograr un sistema aplicable a motores de combustión interna, también se realizarán pruebas contra presiones variables mayores. Esta línea de trabajo allanará el camino hacia el desarrollo y la implementación de motores de combustión interna a hidrógeno, limpios y de alto rendimiento.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Kenneth Gillingham, Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Prudent Intermediate Step or a Step in the Wrong Direction?, Global Climate and Energy Project, Stanford University, 2007.



# 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

[2] F. Barbir, Review of Hydrogen Conversion Technologies, Clean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL 33124, U.S.A.

[3] Ali Mohammadi, Masahiro Shioji, Yasuyuky Nakai, Wataru Ishikura, Eizo Tabo, Performance and combustion characteristics of a direct injection, SI hydrogen engine, International Journal of Hydrogen Energy, 32, 296-304, 2007.

[4] Y. Y. Kim, Jong T. Lee, Gyeung H. Choi, An investigation on the causes of cycle variation in direct injection hydrogen fueled engines, International Journal of Hydrogen Energy, 30, 69-76, 2005.

[5] Jinhua Wang, Zuohua Huang, Yu Fang, Bing Liu, Ke Zeng, Haiyan Miao, Deming Jiang, Combustion behaviors of a direct-injection engine operating on various fractions of natural gas-hydrogen blends, International Journal of Hydrogen Energy, 32, 555-564, 2007.

## **Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer al departamento de ingeniería mecánica del ITBA por disponibilidad de equipos, financiación y la colaboración de sus profesionales. Especialmente Dra. Cecilia Smoglie, Dr. Ing. Sebastian D'hers y Ing. Norberto Lerendegui.

Los autores de este trabajo también agradecen al CIDEI (Centro de Investigación y Desarrollo en Electrónica Industrial) del ITBA, Dr. Miguel Aguirre, Ing. Pablo Cossutta, Ing. Mathias Angelico y Sr. Juan Matus.