

RUIDO Y VIBRACIÓN ORIGINADO POR COMBUSTIONES ANÓMALAS EN UN MOTOR COMERCIAL ALIMENTADO CON HIDRÓGENO

PACS: 43.50.Lj

Diéguez, Pedro M¹.; Urroz, J. Carlos²; Gandía, Luis M³.; Machin, Jorge; Arana, Miguel⁴

ETSIIyT. Universidad Pública de Navarra. Campus de Arrosadia s/n. 31006 Pamplona. Spain.

1pmde@unavarra.es; 2josec.urroz@unavarra.es; 3lgandia@unavarra.es; 4marana@unavarra.es

Palabras Clave: Motores de hidrógeno; Combustiones anómalas; Ruido; Vibración

ABSTRACT

Abnormal combustion is one of the primary limitations constraining the performance of spark-ignition hydrogen-fuelled internal combustion engines (H₂-ICE) because it limits the torque output and efficiency. Understanding the origin and characteristics of this phenomenon in a H₂-ICE will provide better techniques for its detection, prevention and control while enabling operation at conditions of improved efficiency.

An experimental study on anomalous combustions in a commercial engine, the Volkswagen 1.4L-55 kW engine, has been carried out. In order to increase engine power the fuel mixture has been enriched in hydrogen which has led to anomalous combustion. Tests in an engine speed range of 1000 to 5000 rpm have been carried out, making noise and vibration measurements in order to characterize the cycles presenting anomalous combustions. Correlations between internal cylinder pressure, vibration of the engine block and noise for the detected anomalous combustions (detonation and backfire) are presented.

RESUMEN

La combustión anómala constituye una de las limitaciones principales que reducen el rendimiento de los motores de combustión interna alimentados por hidrógeno (H₂-ICE) ya que limita el par y la eficiencia. La comprensión del origen y características del golpe de combustión en un H₂-ICE permitirá desarrollar mejores técnicas para su detección, prevención y control mientras se opera en condiciones de mayor eficiencia.

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio experimental sobre combustiones anómalas en un motor comercial, el motor Volkswagen 1.4L-55 kW. Con el fin de aumentar la potencia del motor se ha enriquecido en combustible la mezcla alimentada, circunstancia que ha provocado combustiones anómalas. Se han llevado a cabo ensayos en un intervalo de velocidades de 1000 a 5000 rpm, realizándose mediciones de ruido y vibración al objeto de caracterizar los ciclos que presentaron combustiones anómalas. Se han obtenido correlaciones entre la presión en el interior del cilindro, vibración del bloque motor y sonido para las combustiones anómalas detectadas (detonación y retroceso de llama).

INTRODUCCIÓN

La detonación (*knocking*) consiste en una combustión rápida, violenta y espontánea de la mezcla aire/combustible en el cilindro, más allá del frente de llama, después de haberse producido el encendido por la chispa. La detonación en un motor produce un golpeteo (*knock*) debido al brusco incremento de la presión de los gases en el interior del cilindro resultando en una onda de presión y grandes fuerzas que actúan sobre los pistones y paredes del cilindro que pueden llegar a resultar seriamente dañados. En una combustión normal, la mezcla aire/combustible inicia su encendido partiendo desde los electrodos de la bujía y progresa a través de los gases no quemados. Por lo general, la llama actúa en un sólo frente, que se va propagando a través de la cámara, hasta alcanzar la cabeza del pistón. Los gases no quemados se calientan hasta su combustión, en parte por la acción de la llama y en parte por compresión, debida a la expansión de los gases generados por la combustión. En cambio, durante la detonación, se tienen dos o más frentes de llama, que chocan entre sí, originando una fuerte onda expansiva, que golpea los pistones con gran fuerza. Esto ocurre porque la temperatura de los gases no quemados aumenta de manera abrupta, antes que sean alcanzados por la llama procedente de la bujía; es decir, cuando la mezcla comienza a quemarse espontáneamente en cualquier otro punto que no sea el frente de llama. Además, la detonación se diferencia de la combustión normal por la violencia con que ocurre. Una combustión normal es rápida, pero homogénea y gradual. Las detonaciones se ven favorecidas por un mal diseño de la cámara, por excesivas relaciones de compresión, una mala sincronización del encendido, un bajo octanaje del combustible y por la presencia de residuos incandescentes, típicamente presentes en las paredes del cilindro. Los motores con encendido electrónico cuentan con sensores de detonación (*knocking sensor*) en el bloque motor que permiten atrasar momentáneamente el avance del encendido hasta que desaparece el fenómeno anómalo.

Las ondas de presión producidas por las detonaciones presentan frecuencias que son modos de vibración acústica [1] [2] características de la geometría de la cámara del cilindro. Las características del hidrógeno como combustible, en particular el amplio intervalo de composiciones en las que la mezcla con aire es inflamable, la baja energía de ignición necesaria y el bajísimo índice de octano (60 aproximadamente), favorecen que un motor alimentado con hidrógeno puede generar detonaciones más intensas en comparación con el motor de gasolina, especialmente si se opera con mezclas combustibles con composición estequiométrica [3]. Los valores de niveles tanto de presión acústica como de vibración del bloque dependen de las condiciones experimentales (absorción del laboratorio, ajuste del motor, etc.). Sin embargo, el objetivo principal de las mediciones es analizar la correlación entre la presión interna del cilindro y la aceleración externa (vibración) del bloque del motor, con el fin de controlar las combustiones anómalas. Con el objeto de evitar este fenómeno, que puede ocasionar en el motor daños irreparables, es habitual que los motores que consumen hidrógeno quemen mezclas pobres. Si bien esta estrategia es positiva también en cuanto a reducción de las emisiones de NOx y el aumento del rendimiento, la disminución de potencia que ello conlleva es una consecuencia muy negativa. Por este motivo, es interesante poder detectar los problemas de combustión anómala con rapidez suficiente para poder adoptar estrategias de operación del motor que permitan extraer la máxima potencia posible.

OBJETIVOS

En la bibliografía aparecen pocos estudios experimentales con motores comerciales alimentados con hidrógeno. La mayoría de las investigaciones se han llevado a cabo a bajas velocidades, normalmente a unas 900 rpm con motores monocilíndricos de investigación, donde la detonación es provocada habitualmente por un aumento de la relación de compresión, circunstancia que no se corresponde con el modo de funcionamiento de un motor comercial en un vehículo. En este

trabajo se presenta un estudio experimental sobre combustiones anormales en un motor comercial, el motor Volkswagen 1.4L-55 kW. Las combustiones anormales se han provocado mediante el enriquecido de la mezcla de combustible logrado al aumentar el tiempo de inyección para velocidades del motor de 1000, 2000, 3000, 4000 y 5000 rpm. Otros trabajos [4] [5] han tenido como objetivo correlacionar la presión en el cilindro con la aceleración o vibración del bloque motor para poder detectar la detonación en el cilindro empleando un sencillo sensor piezoeléctrico (sensor de picado de biela). En el presente trabajo se extiende la investigación a un motor comercial y a unos regímenes de velocidad habituales en motores para automoción. También se estudia la posible correlación de los niveles sonoros con la presión en el cilindro y la vibración del bloque motor. La detonación se ha provocado sólo en uno de los cuatro cilindros del motor por motivos de seguridad.

DISPOSITIVO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los valores inherentes al ciclo de combustión de las variables estudiadas (presión en el interior del cilindro, vibración del bloque motor y sonido ambiente) han sido medidos con una frecuencia de 100 kHz. Los valores propios del funcionamiento del motor (velocidad, temperaturas, tiempos de inyección, emisiones de NOx, etc.) han sido medidos con una frecuencia de 10 Hz.

La presión sonora se midió con un micrófono de condensador GRAS 40AC (con una sensibilidad de 12.5 mV/Pa, e intervalo de medida de hasta 40 kHz) colocado a 1 m de distancia del bloque motor. La vibración se midió con un acelerómetro piezoeléctrico triaxial B&K tipo 4504 (con una sensibilidad de 10 mV/g y frecuencia de 1 Hz-10 kHz) colocado en el bloque motor, sobre el cilindro alimentado con hidrógeno. Todo el dispositivo experimental se encontraba en un recinto semianecoico, con absorbente en paredes y techo.

Se han llevado a cabo ensayos a las velocidades de motor de 1000, 2000, 3000, 4000 y 5000 rpm. El avance al encendido se fijó en 10° antes de punto muerto superior (10° BTDC) y el comienzo de la inyección a 22° después de punto muerto superior (22° ATDC). Este ángulo se ha elegido con el fin de inyectar tras el cierre de la válvula de escape; el retraso al cierre del escape es de 19° . La relación aire a combustible en la mezcla (dosado) se estableció inicialmente en un valor pobre ($\lambda=1.7$).

En cada ensayo, tras el arranque del motor, calentamiento y alcanzado un funcionamiento estable, se procede a un ligero aumento del pulso de inyección para dejarlo constante durante unos segundos a fin de medir una respuesta estabilizada. Sucesivamente se va incrementando el pulso de inyección hasta que aparecen las primeras combustiones anómalas, caracterizadas auditivamente por un breve sonido metálico (*pinging noise*) seguido de un fuerte sonido grave si bien, en algunos casos, se produce directamente el fuerte sonido grave. Tras la aparición de este fuerte sonido, que coincide con una brusca caída del par motor, se procede inmediatamente a la parada del motor, desconexión de sensores y fin del ensayo.

La duración de los ensayos ha sido variable según la velocidad del motor, oscilando entre 1 y 10 minutos. Las combustiones anómalas aparecieron antes a altas velocidades. La frecuencia de muestreo ha sido de 0.1 MHz para las señales de presión, aceleración y sonido en todos los ensayos, lo que implica 12 000 registros por ciclo para el ensayo a 1000 rpm, 6000 a 2000 rpm, 4000 a 3000 rpm, 3000 a 4000 rpm y 2400 a 5000 rpm. Sin embargo, este número de registros por ciclo varía ligeramente, dado que, aunque la consigna para el banco de ensayos es velocidad constante, esta velocidad no es perfectamente estable, aumentando el número de registros por ciclo cuando la velocidad es menor que la velocidad de consigna y viceversa. El número de ciclos registrados, también variable en cada ensayo, ha oscilado entre 2000 y 10000.

Para la aceleración, la componente en la dirección del eje del cilindro registró los valores más elevados de vibración. En adelante, nos referiremos exclusivamente al valor de la aceleración registrada en esta dirección (A_z) ubicado en la dirección axial.

La detonación es difícil de detectar con claridad, pero se caracteriza por la existencia de un rizado y de un elevado pico en la señal de presión en el interior del cilindro. A pesar de la presencia de

ciclos detonantes, el motor sigue suministrando par. Por otro lado, el retroceso de llama se detecta por un incremento repentino de la temperatura del aire en el colector de admisión. Asimismo, dado que el combustible se ha quemado fuera del cilindro o dentro del cilindro, pero con las válvulas abiertas, se produce una brusca caída de par motor y velocidad.

RESULTADOS

La Fig. 1 muestra las señales temporales de la presión interna del cilindro (P_{int} en bar), la presión acústica exterior registrada por el micrófono (P_{ac} en Pa), la aceleración en la dirección z en la parte del bloque motor del cilindro alimentado con hidrógeno (A_z en g) y la temperatura en colector de admisión (T en K). En este ejemplo, el motor funcionó a 2000 rpm. También se muestra la evolución de parámetros característicos del funcionamiento del motor, tales como el par, emisiones de NOx, dosado y duración del pulso de inyección.

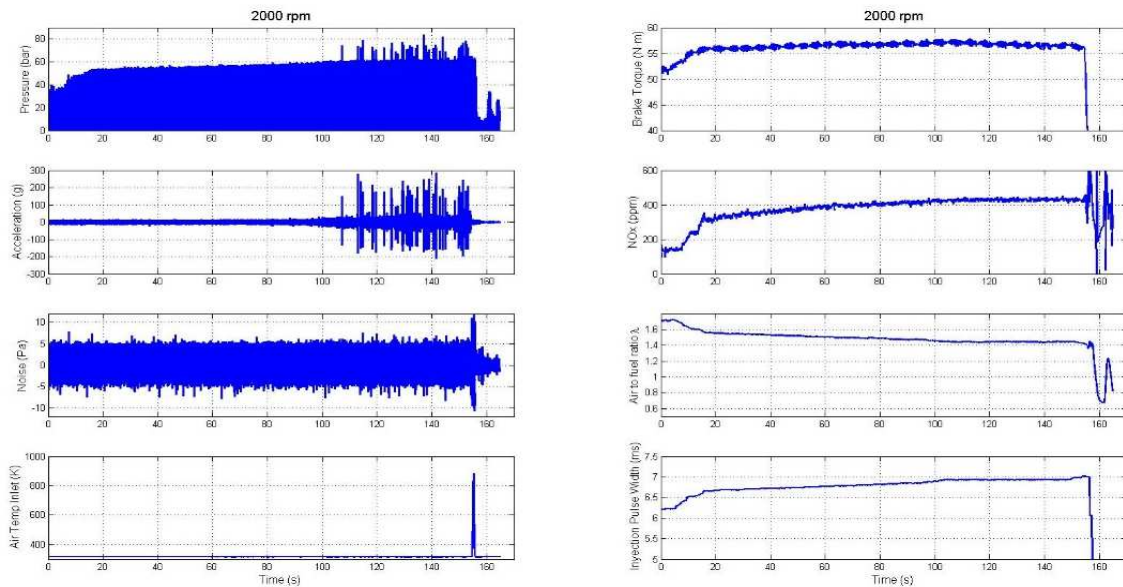


Fig. 1 Resultados de P_{int} , P_{ac} , A_z , T , y parámetros del motor para un ensayo a 2000 rpm.

El ensayo comienza con el mismo pulso de inyección en los cuatro cilindros, concretamente 6.2 ms ($\lambda=1.7$). Se incrementa paulatinamente la duración del pulso de inyección sólo en uno de los cilindros, en el que está ubicado el sensor de presión. Este incremento del pulso de inyección implica un descenso de λ (la mezcla se enriquece en combustible) que se traduce en un aumento del par motor y de las emisiones de NOx. Hasta los aproximadamente 100 s de ensayo, alcanzando los 6.9 ms de pulso de inyección, el motor funciona de manera estable. A los 103 s, se produce la primera detonación, audible, que va acompañada de una fuerte aceleración (160 g). En ese momento se deja de enriquecer la mezcla y, como se puede apreciar en la Fig. 1, el motor entra en una fase de unos 20 s de duración en la que, sin aumentar el tiempo de inyección, se producen detonaciones audibles y fuertes vibraciones del bloque motor, manteniéndose el par motor casi constante, con una ligerísima tendencia a disminuir. Sin modificación del tiempo de inyección, a los 155 s, se produce un ruido ronco muy fuerte, caída total del par, registros ilógicos en los sensores del escape y un elevado registro de la temperatura del aire de admisión. Esto indica que ha tenido lugar un retroceso de llama al colector de admisión. La vibración del bloque motor disminuye hasta ser menor que en funcionamiento estable. En este punto se detiene voluntariamente el ensayo.

Las magnitudes de presión acústica y vibración del bloque motor se modifican en las combustiones anómalas con respecto a sus valores durante la combustión normal; ligeramente

en el caso de la presión acústica y drásticamente para la de vibración. La Fig. 2 muestra la presión interna en el cilindro (bar) y la presión acústica exterior (Pa) en un registro de 0.4 segundos, tanto para combustiones normales (figura superior) como para combustiones anómalas (figura inferior).

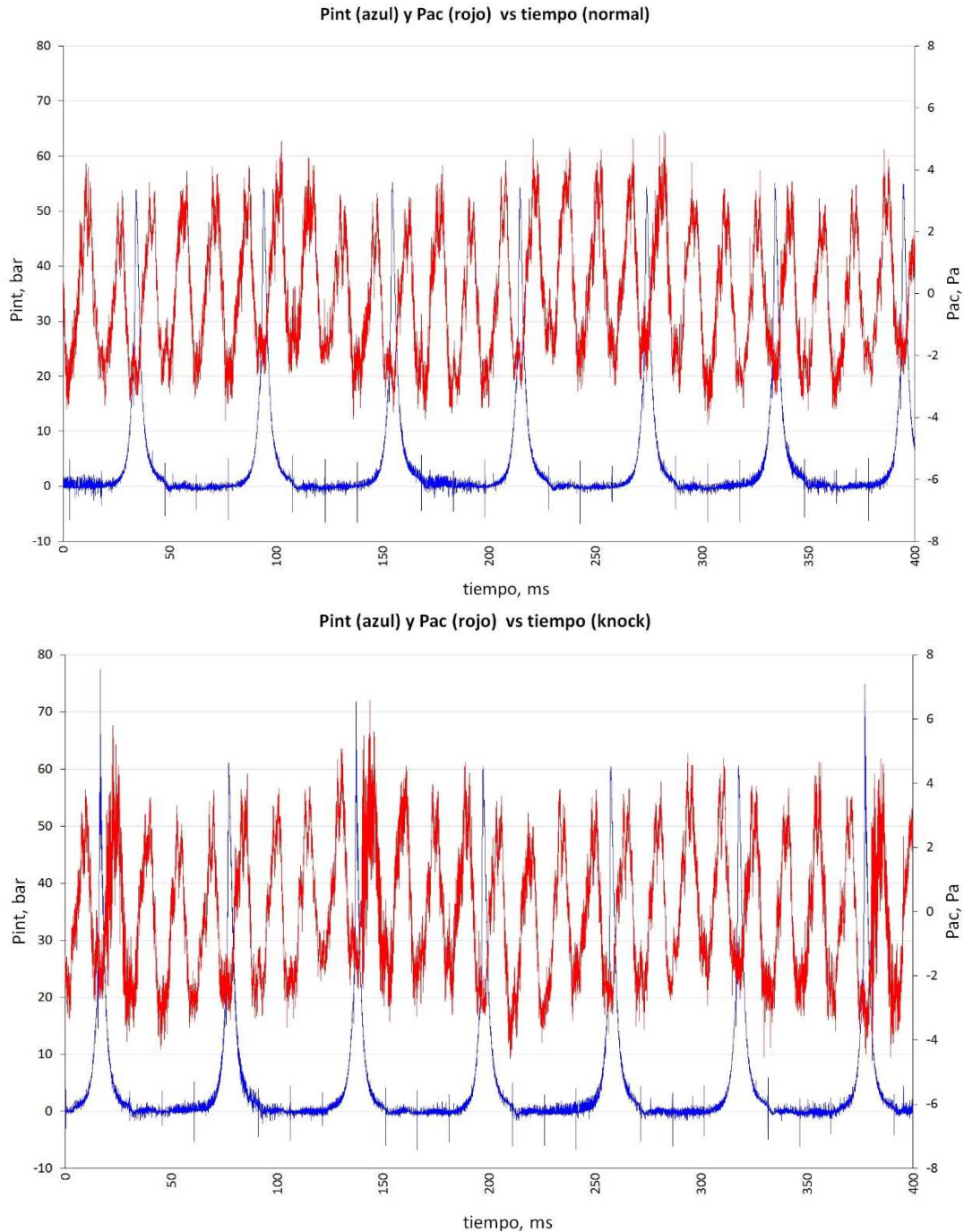


Fig. 2 Presiones interna (Pint) y acústica (Pac) para combustiones normales (superior) y anómalas (inferior; ciclos 1, 3 y 7)

El análisis espectral (en bandas de tercio de octava) de tales señales acústicas muestra ligeros incrementos del ruido emitido en las combustiones anómalas respecto de las normales. Lo más

destacable es el incremento en torno a 8-10 dB en las bandas de altas frecuencias (entre 8 y 20 kHz) tal como muestra la Fig. 3.

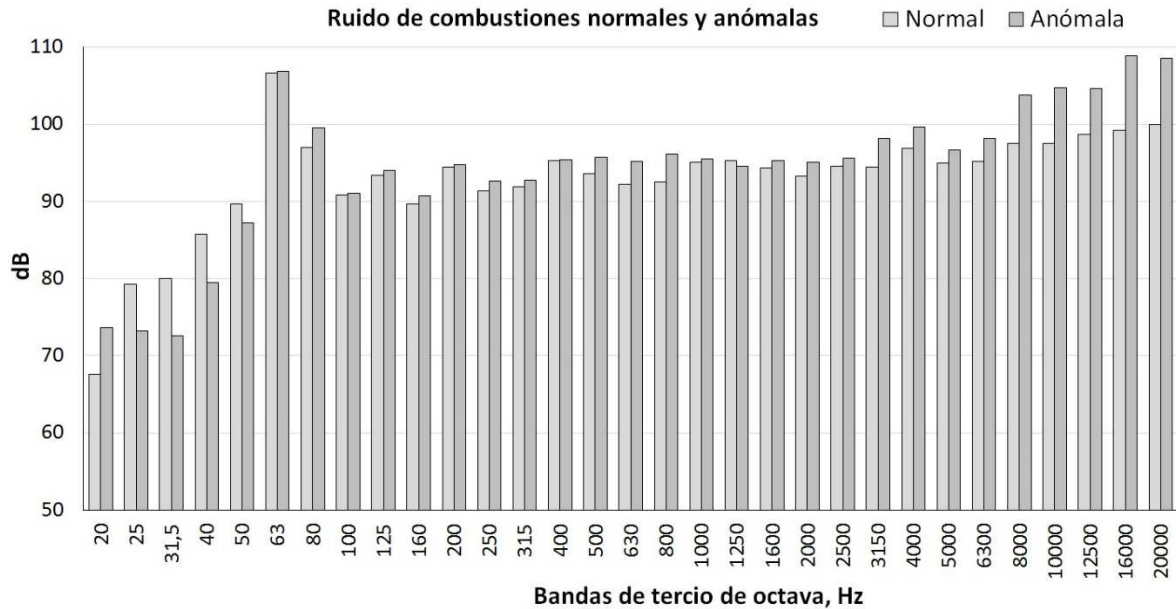
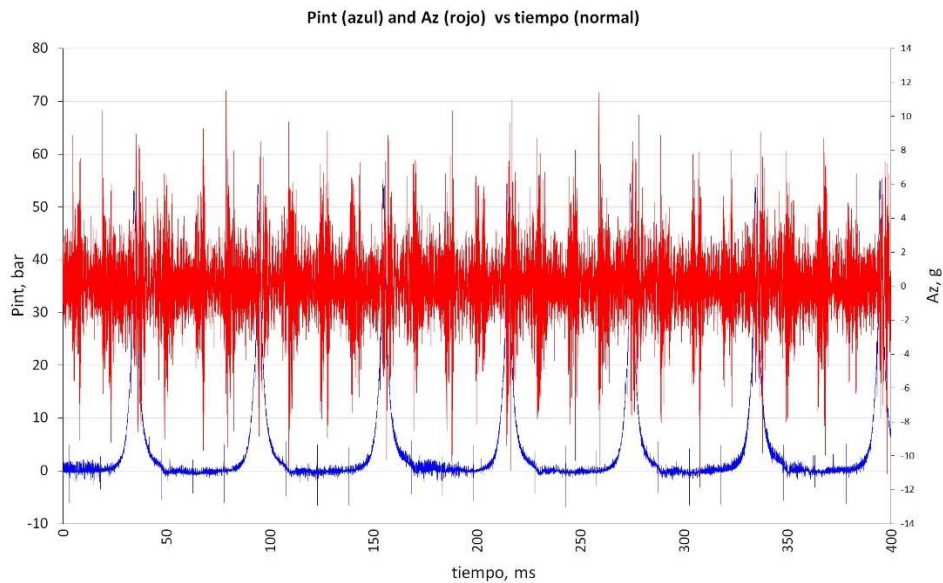


Fig. 3 Análisis en tercios de octava para combustiones normales y anómalas

Mucho más destacables son los cambios que se producen en la magnitud de la vibración del bloque motor. Si bien se midieron las aceleraciones en tres ejes, mostraremos los resultados para el eje con mayores valores de vibración. La Fig. 4 muestra la aceleración del bloque motor en los mismos ciclos de combustión, normal y anómala, mostrados en la Fig 2. Es preciso destacar la diferente escala del eje vertical secundario, aceleración en unidades de g.



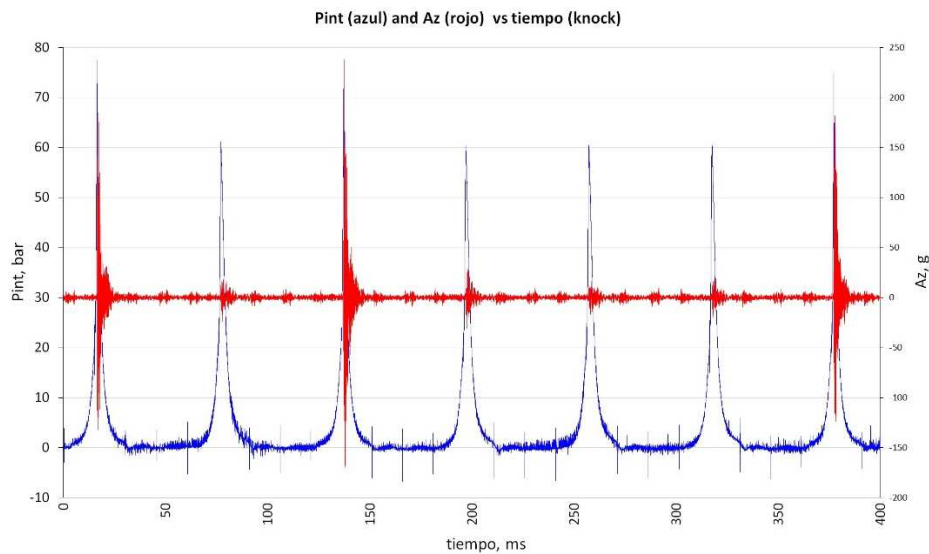


Fig. 4 Presión interna y vibración del bloque motor para combustiones normales (superior) y anómalas (inferior) de la Fig. 2.

Los bruscos e intensos incrementos de la presión interna del cilindro (característica fundamental de un ciclo de combustión anómalo) son la causa de los elevadísimos incrementos en la vibración del bloque motor. La Fig. 5 muestra tales aceleraciones para los tramos superiores de los ciclos de combustión segundo y tercero (normal y anómalo, respectivamente) mostrados en la Fig. 2. Como vemos, los valores de la aceleración pasan de unas pocas unidades de g a valores por encima de 100 g. El análisis espectral de las señales de aceleración muestra que es en muy altas frecuencias donde las combustiones anómalas generan los elevados niveles de vibración, especialmente en las frecuencias por encima de 6 kHz..

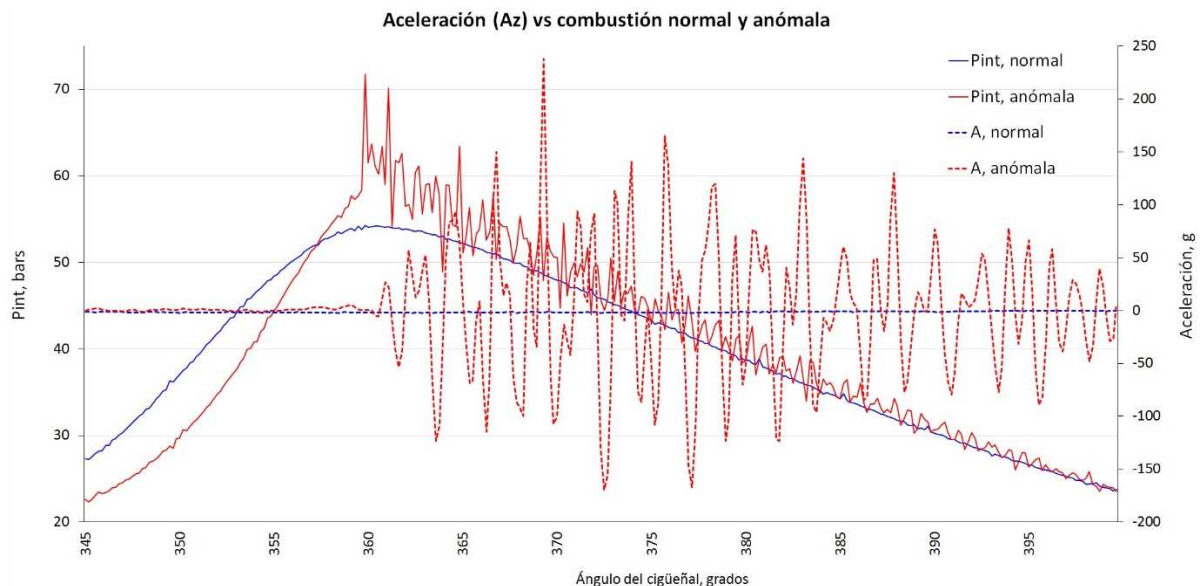


Fig. 5 Vibración del bloque motor para combustión normal y anómala (tiempo total: 3,6 ms)

Un aspecto destacable, a nivel acústico, se produce en el proceso del retroceso de llama, cuando se alcanzan temperaturas del aire superiores a 800 K. Estas elevadas temperaturas lanzan gases a gran velocidad hacia el escape, generando un sonido 'ronco', con elevadas componentes en bajas y medias frecuencias. La Fig. 6 muestra el análisis espectral del sonido producido por las

combustiones normal y anómala, así como el sonido generado en el proceso del retroceso de llama. Como se ve, las combustiones anómalas generan ruidos en las muy altas frecuencias, sonido 'metálico' (*slap*) producido probablemente por el cabeceo del pistón sobre las paredes del cilindro. Por el contrario, el retroceso de llama produce los niveles más elevados en las frecuencias entre 250 Hz y 1 kHz, con origen en el tubo de escape del motor.

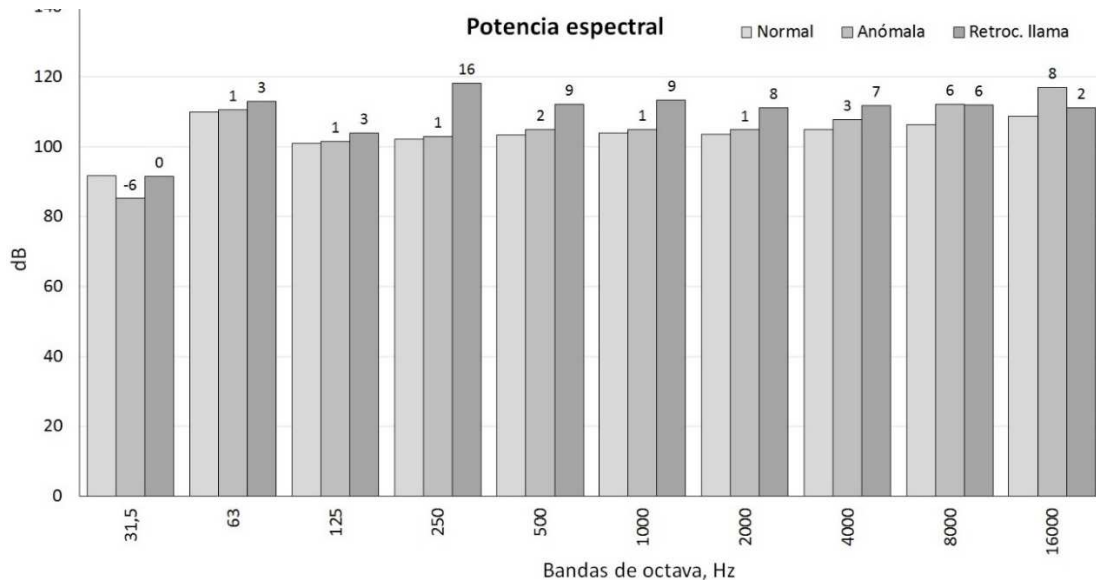


Fig. 6 Análisis en octavas para combustiones normal, anómala y con retroceso de llama

CONCLUSIONES

Existe una relación directa entre detonación y aceleración del bloque motor (vibración) para un motor comercial alimentado con hidrógeno, en todo el rango de velocidades habituales en automoción. La relación implica una alta correlación entre aceleración del bloque motor y presión en el interior del cilindro. Este hecho permite detectar detonaciones mediante un acelerómetro ubicado en el bloque motor, tecnología de uso habitual en motores alimentados por gasolina. En el motor comercial estándar en estudio alimentado con hidrógeno, un valor de 30 g medido por el acelerómetro, indica detonación en el interior del cilindro, lo que debería llevar al sistema de control a disminuir el pulso de inyección de combustible. Los ciclos detonantes tienen picos de presión más elevados que los ciclos normales, por lo que siguen suministrando potencia y son difíciles de detectar, a pesar del gran daño que pueden causar al motor por lo que se debe realizar un notable esfuerzo para su detección temprana de cara a la introducción del hidrógeno como combustible de motores de combustión interna alternativos.

REFERENCIAS

- [1] Szwaja S, Naber J. D. Dual nature of hydrogen combustion knock. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 12489-12496 (2013)
- [2] Pan J, Sheppard CGW. A theoretical and experimental study of the modes of end gas autoignition leading to knock in SI engines. SAE 942060, 1994
- [3] Brunt M, Pond C, Biundo J. Gasoline engine knock analysis using cylinder pressure data. SAE 980896, 1998
- [4] Hailin Li; Ghazi A. Karim, Knock in Spark Ignition Hydrogen Engines, *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, 859 – 865, (2004)
- [5] Szwaja S, Bhandary KR, Naber JD. Comparisons of hydrogen and gasoline combustion knock in a spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 5076-5087 (2007)