

# Diagnostico de un motor de gasolina de cuatro cilindros mediante el análisis de vibraciones

## Diagnostic of a four cylinder gasoline engine using vibration analysis

Jairo Andrés-Grajales, Juan Fernando-López, Héctor Fabio-Quintero

Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica. Pereira, Colombia

Correo electrónico: [ntc1687@hotmail.com](mailto:ntc1687@hotmail.com)

Recibido: 20 de mayo de 2015      Aceptado: 30 de julio de 2015

### Resumen

Este trabajo presenta el análisis de vibraciones de un motor de combustión interna, operando con diferentes mezclas de combustible, para identificar condiciones de operación con falla, utilizando un banco de pruebas y la falla estudiada fue el "misfire". Tres mezclas de combustible fueron probadas: E8, E20 y E30. Aplicando la transformada rápida de Fourier a las señales, se compararon las condiciones de operación normal y con falla entre combustibles, buscando componentes de frecuencia característicos para evaluar la validez de los estudios realizados hasta ahora en gasolina pura. Los resultados muestran que el comportamiento

utilizando las diferentes mezclas de combustible es similar al reportado con gasolina pura, y los componentes de frecuencia que diferencian la condición normal y con falla también están presentes en las mezclas de combustible. Se extrajeron características estadísticas de las señales en el dominio de la frecuencia para simplificar el proceso de identificación.

**Palabras clave:** motor de combustión interna, vibraciones, detección de fallas, problema de encendido, mezclas gasolina-etanol.

### Abstract

This paper presents the vibration analysis of an internal combustion engine, using different fuel blends, to identify fault operating conditions. A purpose built engine test bench was used and the fault studied was misfire. Three fuel blends were used: E8, E20 and E30. Fast Fourier transform was applied to the signals. A comparison between normal and faulty operating conditions was carried with every fuel used, looking for characteristic frequency components, to assess the validity of past studies on misfire performed on pure gasoline. The results show that the behavior

using the different fuel blends is similar to the one reported on pure gasoline, and that the frequency components that differentiate normal and faulty conditions are also present on the fuel blends. Statistical characteristics were extracted from the signals in the frequency domain to simplify the identification process.

**Key words:** internal combustion engine, vibration, fault detection, misfire, ethanol-gasoline blends.

### Introducción

En la industria actual el mantenimiento predictivo juega un papel muy importante. Con el uso continuo, las máquinas desarrollan fallas y problemas de operación, razón por la cual estos defectos deben ser detectados con precisión antes que causen daños en las partes o falla catastrófica de la máquina [1]. Uno de los componentes fundamentales de muchas plantas industriales es el motor de combustión interna. Con el fin de reducir las emisiones contaminantes y la dependencia en las reservas de petróleo del mundo, se han estado utilizando combustibles alternativos como reemplazo total o parcial (mezclas de combustible) de la gasolina, principalmente el etanol. Mezclas de 85 % de contenido de etanol y mayores se utilizan en motores específicamente diseñados para operar con etanol, mientras que mezclas de alrededor de 10 % son usadas en motores diseñados para gasolina, pero se busca incrementar este último porcentaje por lo que se requiere investigar los efectos de mezclas mayores en estos motores. Los efectos de las mezclas etanol-gasolina (E5, E10) y metanol-gasolina (M5, M10) en el desempeño de un motor de un vehículo operando en un dinamómetro de chasis a diferentes velocidades y cargas fueron estudiados en [2], encontrándose que con las mezclas se incrementa el consumo específico de combustible, y la presión del gas en el cilindro comenzaba a incrementarse más tarde que en la gasolina. En [3] se estudia el desempeño y las emisiones de un motor de encendido por chispa utilizando mezclas de metanol, con el acelerador al máximo, a diferentes velocidades, los resultados muestran que el desempeño mejoró con el uso de metanol, las emisiones de CO y HC se redujeron con el incremento en el contenido de metanol mientras que las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> se incrementaron.

Se han realizado diversos trabajos en el monitoreo de condición de motores de combustión interna. La medición principal utilizada es la presión en el cilindro [4], porque provee la mayor cantidad de información del proceso de combustión, pero es un método costoso (sensores de alto costo y se requieren modificaciones en el motor para su instalación) y es invasivo, razones por las que se han realizado desarrollos en el uso de sensores menos intrusivos. Algunos han tenido un buen desempeño, como es la medición de la velocidad angular [5, 6], análisis de aceite [7], temperatura superficial, emisiones de escape, etc., pero el principal interés está en el uso de sensores basados en la medición de la aceleración, como los acelerómetros [8, 9], sensores

acústicos [10] y de golpeteo [11]. Estos han tenido buen desempeño y amplio desarrollo en el monitoreo de condición de máquinas rotativas [12], pero han tenido dificultades al aplicar métodos tradicionales de análisis a las condiciones particulares de los motores de combustión interna, principalmente debido a la naturaleza no estacionaria de las señales medidas. Sin embargo, se ha realizado un amplio trabajo en esta área. En [9] se presenta una metodología para el diagnóstico no intrusivo de un motor diesel *common-rail* basado en el análisis de la vibración medida en un acelerómetro utilizando el PSD, *power spectral density*, determinando la presencia de bandas de frecuencia significativas. Se propone en [1] un método de monitoreo de condición para un motor diesel basado en un sistema de redes neuronales multi-red de tres niveles para estimar carga, presencia de falla y tipo o ubicación de la falla basado en la vibración medida con un acelerómetro y las temperaturas del escape en cada cilindro. En [13] se realiza un diagnóstico no-lineal de falla en motores diesel usando varias técnicas de análisis de señales y métodos para enfrentar las dificultades inherentes a las vibraciones en estas máquinas. Un método de diagnóstico se propone en [10] basado en el análisis de las señales de vibración y de las emisiones acústicas, realizando el promedio de varios ciclos para calcular la energía del fenómeno con el *rms*. Los parámetros de combustión se determinaron en [5] a partir de la medición de la velocidad angular, utilizando redes neuronales. Estos trabajos han sido realizados sin considerar la influencia de las mezclas alcohol-gasolina como combustible en las características de la vibración. El trabajo realizado en [14], mostró, en gasolina normal, que cuando se presenta una anomalía como el *misfire*, la composición espectral de la señal de vibración de un motor cambia, y aparecen picos diferentes a los de la frecuencia de combustión.

El presente estudio se realizó para evaluar los efectos de utilizar diferentes mezclas de gasolina y etanol como combustible en la composición espectral de la señal de vibración del motor, en condiciones de falla, en este caso *misfire* simulado en el cilindro cuatro. Este trabajo mostró que las mismas frecuencias características y picos reportados en gasolina pura se presentan en las mezclas etanol-gasolina E8 (combustible comercial), E20 y E30, al realizar las pruebas en condiciones de *misfire*. Y que ciertas características estadísticas pueden ser extraídas de las señales en ciertas bandas en el dominio de la frecuencia, para simplificar el proceso de identificación.

## Métodos y Materiales

### Montaje experimental

La figura 1 presenta el banco de pruebas experimental usado, el cual consiste de un motor de combustión interna de dos litros, cuatro cilindros y encendido por chispa, montado en una estructura móvil que permite un fácil acceso a los componentes del motor y simplifica el monitoreo de condición, en términos de fugas y temperaturas. Las mediciones se realizaron utilizando ocho instrumentos diferentes: Tres acelerómetros (uno ubicado verticalmente en la parte superior del motor, uno longitudinal al eje del cigüeñal montado en el bloque cerca al cilindro número uno y uno en una dirección normal al eje del cigüeñal montado en el bloque entre los cilindros dos y tres), un sensor de emisiones acústicas, un sensor de golpeteo, un *encoder*, un sensor de chispa de ignición y un sensor de presión ubicado en el cilindro número uno. Las señales de todos los instrumentos se alimentaron a dos módulos de adquisición de señales, un NI 9223 (tres canales de entrada analógica +/- 30V) y un NI 9234 (cuatro canales de entrada analógica +/- 5V), montados en un chasis (NI cDAQ 9174). Este módulo envía los datos a través de conexión USB a un computador portátil, que permite el almacenamiento y posterior procesamiento de la información. Se realizaron pruebas para establecer velocidades estables del motor para las mediciones y asegurar condiciones confiables de funcionamiento en los largos periodos de prueba.



Fig. 1. Montaje experimental.

## Procedimiento de prueba

Como se explicó anteriormente, se ha utilizado principalmente el etanol como sustituto de la gasolina, y dado que los motores diseñados para operar con etanol no son tan comunes en el comercio, se estudian las mezclas de gasolina y etanol, incluyendo la mezcla comercializada en estaciones de servicio y dos mezclas superiores que se han propuesto como posibilidad de incremento del porcentaje de etanol, y que aún son estudiadas para determinar sus efectos en los motores. Los combustibles utilizados durante las pruebas fueron:

- E8: Combustible comercialmente, mezcla de ocho por ciento de etanol con gasolina.
- E20: Mezcla de veinte por ciento de etanol con gasolina.
- E30: Mezcla de treinta por ciento de etanol con gasolina.

Aprovechando las ventajas del banco de pruebas, el motor y el fácil acceso a sus componentes, se realizaron mediciones en dos condiciones de operación diferentes:

- Normal: Los cuatro cilindros funcionando, utilizando el ángulo de avance estándar del distribuidor.
- *Misfire* del pistón: *Misfire* simulado, desconectando el cable de alta de la bujía, utilizando el ángulo de avance estándar del distribuidor.

La recolección de datos se realizó a tres velocidades diferentes: 1500, 1700 y 2000 rpm, para cada condición, operando con cada combustible presentado anteriormente, y guardando la información de los ocho instrumentos al mismo tiempo. Tres grupos de datos fueron obtenidos en cada velocidad constante. Haciendo uso de los equipos de adquisición de datos la frecuencia de muestreo que se utilizó fue 51.2 kHz/canal, y las mediciones se realizaron por dos segundos, para cada juego de datos.

## Análisis aplicado

Los análisis utilizados en este estudio son ocho características estadísticas:

<i>Root mean square</i> (RMS)	<i>Skewness</i>
Media aritmética,	Energía
Kurtosis	Valor máximo
Desviación estándar	Valor mínimo

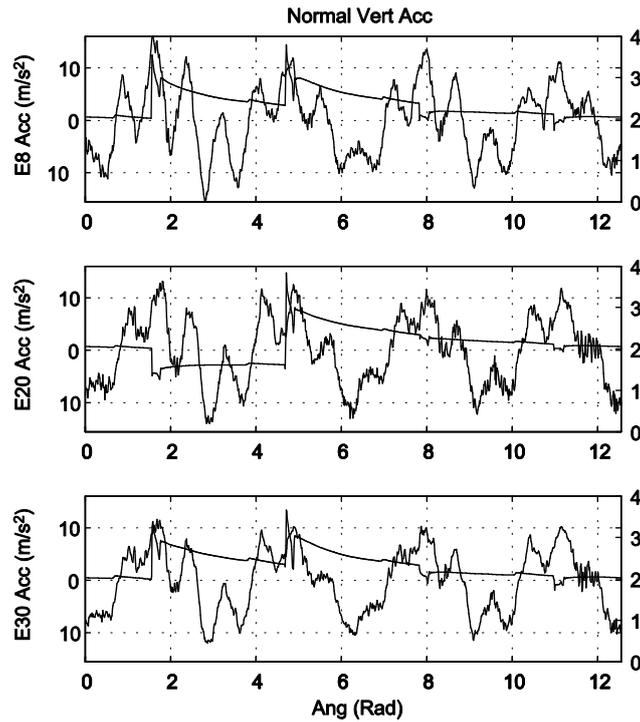
Extraídas a partir de las señales en diferentes dominios y bandas de frecuencia de esta forma:

- Señales en el dominio del tiempo.
- Transformación de la señal al dominio de la frecuencia:
  - Espectro completo.
  - Bandas de frecuencia:
    - 0-0.9 veces la frecuencia de combustión.
    - 0.6-0.9 veces la frecuencia de combustión.
    - 0-1.25 veces la frecuencia de combustión.
    - 1.25-2.25 veces la frecuencia de combustión.
    - 2.75-4.25 veces la frecuencia de combustión.
    - 0-7 veces la frecuencia de combustión.

## Resultados

Las pruebas comenzaron con la preparación del motor, lo cual implicaba llevar el motor a una temperatura estable de funcionamiento y mantener una operación confiable. Hecho esto, se instaló el sensor de presión y comenzaron las mediciones. Comenzando con el combustible comercial E8, se tomaron las tres mediciones para 1500 rpm, 1700 rpm y 2000 rpm, posteriormente se desconectó la bujía del cilindro número cuatro y se repitió el proceso para la falla simulada. Una vez terminadas las pruebas, se retiró el combustible del tanque y se drenó del sistema, antes de utilizar una mezcla diferente. El proceso completo se repitió para las mezclas de combustible E20 y E30. Una de las mediciones del acelerómetro vertical se muestra en la figura 2.

Para ver las señales en el dominio de la frecuencia, se utilizó la transformada rápida de Fourier. Se compararon estas nuevas señales para identificar diferencias en los componentes de frecuencia en las condiciones de operación probadas, y ver si las diferencias seguían presentes al utilizar las diferentes mezclas. En primer lugar se comparan las vibraciones en la dirección transversal, la cual ha sido reportada como la que provee la información más significativa [14].



**Fig. 2.** Aceleración vertical, condiciones de operación normal en los tres combustibles, detección de chispa en el segundo eje

La figura 3 muestra las señales en el dominio de la frecuencia de los tres combustibles en condiciones de operación normal y de falla, a 1500 rpm. Considerando la velocidad de 1500 rpm, en un motor de cuatro cilindros y cuatro tiempos, la frecuencia de combustión (CF) es 50 Hz, y la frecuencia de revolución o de velocidad (RF) es 25 Hz.

Como muestra la figura 3, en condiciones normales los picos más altos son CF y RF, con un pico a 2 veces CF. Este comportamiento aparece en los tres combustibles, sin diferencias significativas entre ellos. De acuerdo con [14], debería observarse un único pico en CF, por lo cual nuestros resultados deben reflejar condiciones diferentes, relacionadas con algún desbalance que produce el pico en RF, además de posibles diferencias en los apoyos del motor. Bajo condiciones de falla también se presentan picos en CF, RF y 2 CF pero esta vez el pico en RF es mucho mayor. Más interesante es el hecho que se tiene un nuevo pico alrededor de 0,75 CF (relacionado con el hecho que tres de los cuatro cilindros están funcionando), así como en 1,25 CF y 1,5 CF, proveyendo diferencias significativas entre condiciones normal y de falla. Estos comportamientos aparecen en todos los combustibles de la misma forma, aunque nuevamente sin diferencias notables entre los combustibles (para separar los combustibles). Esto es similar a los resultados presentados en [14] para la desconexión de una bujía, con diferencias que pueden ser atribuidas al montaje del motor, movimientos y deformaciones estructurales y accesorios montados. En todas las señales mostradas en la figura 3, entre 400 y 700 Hz, se observan varios picos, en lo que parece ser una respuesta de resonancia de la estructura que soporta el motor, dado que aparece en prácticamente todas las mediciones de vibración realizadas. Se encontraron resultados similares a 1700 rpm, como puede verse en la figura 4 y a 2000 rpm.

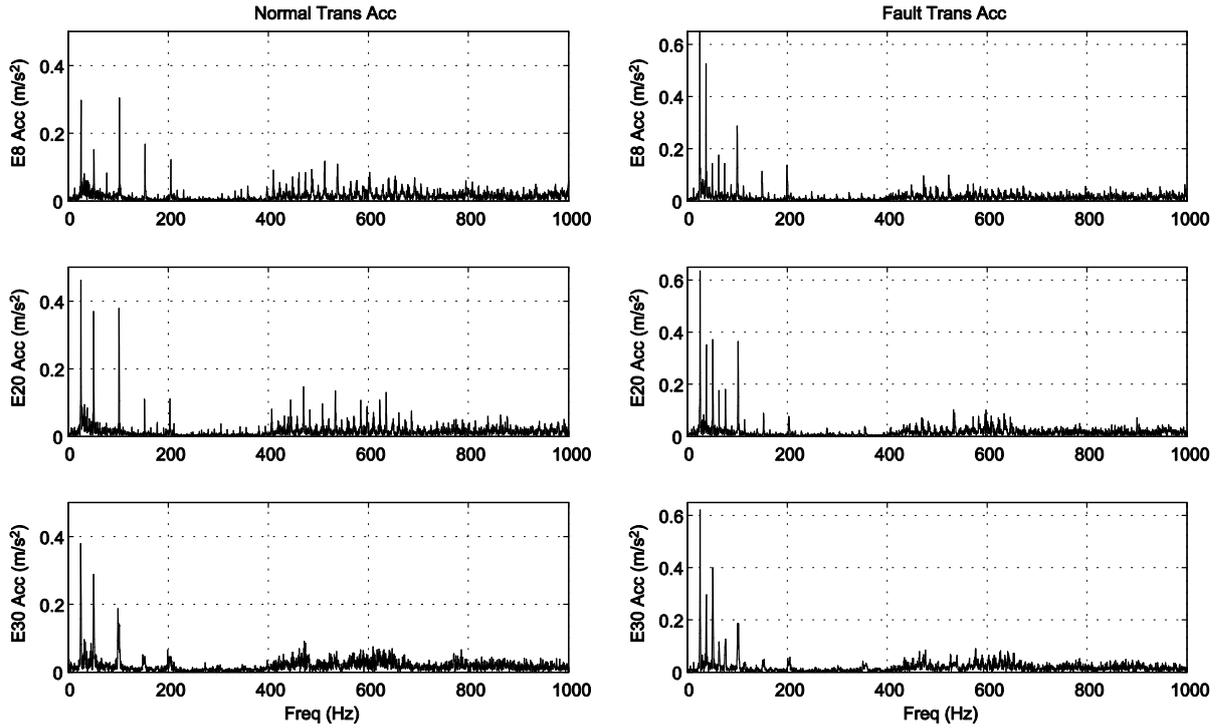


Fig. 3. Aceleración transversal, condiciones de operación normal y de falla en los tres combustibles, 1500 rpm

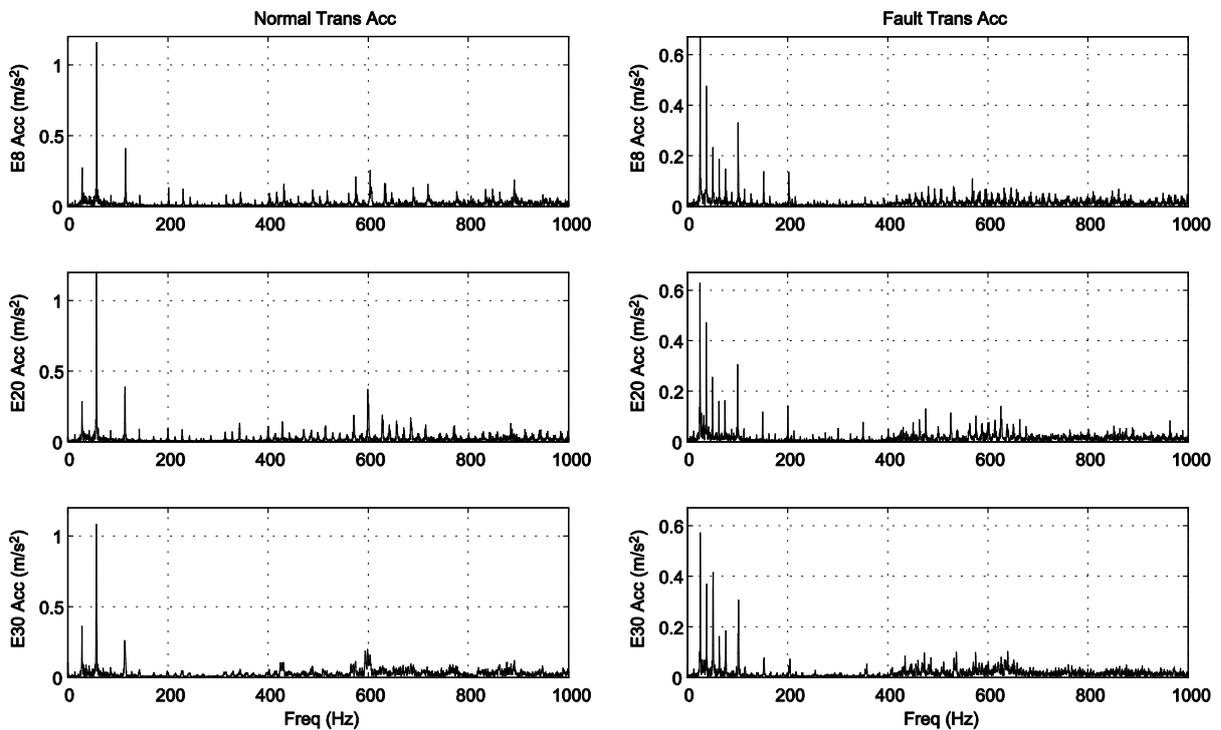
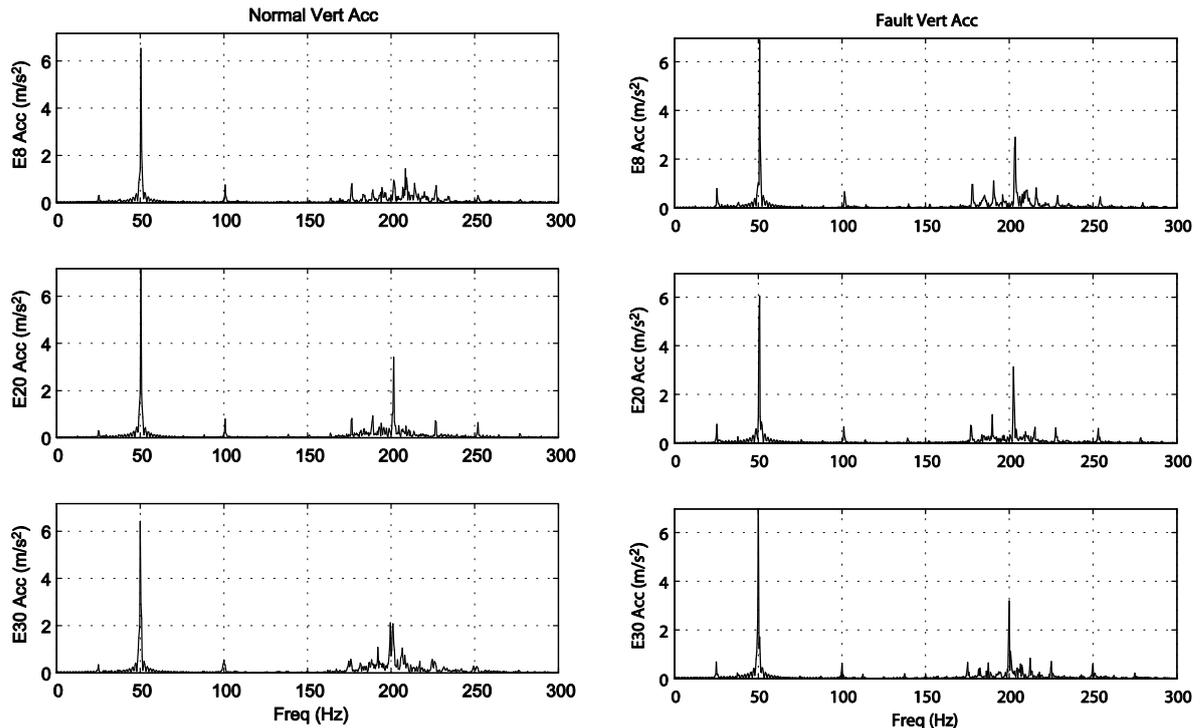


Fig. 4. Aceleración transversal, condiciones de operación normal y de falla en tres combustibles, 1700 rpm.

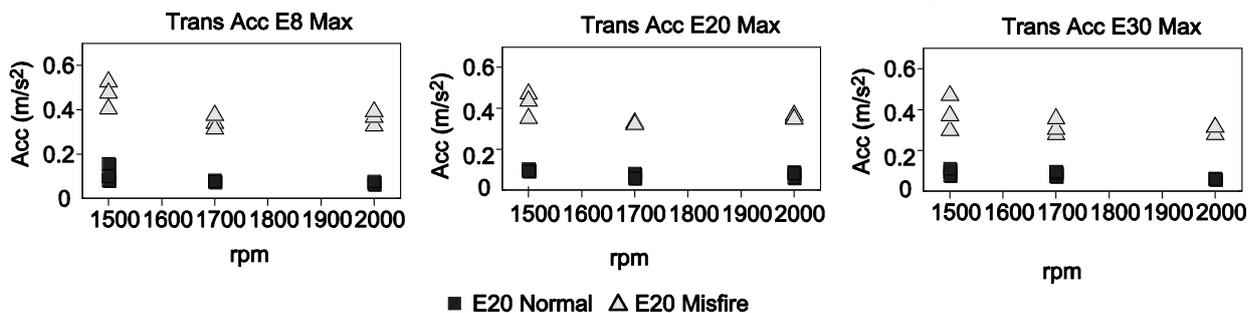
Comparando las señales de la aceleración vertical no se obtuvieron diferencias significativas entre condiciones de operación normal y de falla, en una comparación estrictamente visual, tal y como es mencionado en [14], como puede ser visto en la figura 5. El pico en CF aparece claramente en ambas condiciones, pero la única diferencia visible es un muy ligero incremento en el pequeño pico en RF en condiciones de falla. Nuevamente no se encontraron diferencias notables entre los combustibles utilizados en las pruebas.



**Fig. 5.** Aceleración vertical, condiciones de operación normal y de falla en tres combustibles, 1500 rpm

La misma comparación realizada en las señales de aceleración longitudinal, tampoco mostró diferencias significativas entre las condiciones de operación.

Para tratar de simplificar el proceso de identificación se extrajeron varias características estadísticas de las señales de vibración, en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, en el espectro completo y en varias bandas de frecuencia. Como muestran los resultados del análisis visual de las gráficas, las características estadísticas que revelaron claramente las diferencias entre las condiciones fueron las extraídas de las bandas de frecuencias bajas, en particular frecuencias menores a 1 CF. Las características de la aceleración transversal en la banda de frecuencia 0.6-0.9 CF se muestran en la figura 6:



**Fig. 6.** Aceleración transversal, condiciones de operación normal y de falla en tres combustibles, valor máximo, 0.6-0.9 CF

Esta banda (0.6-0.9 CF) fue seleccionada basándose en los resultados de las comparaciones previas entre las transformaciones en el dominio de la frecuencia. Con todas las características estadísticas utilizadas se revelaron con claridad las diferencias entre las condiciones de operación en todas las mezclas de combustible y todas las velocidades probadas, utilizando la señal de vibración transversal, con los parámetros de prueba dados (sin carga, 1500, 1700 y 2000 rpm, motor de cuatro cilindros). La figura 6 muestra el valor máximo. Como muestran los resultados, el valor máximo, para la banda de frecuencia 0.6-0.9 CF es considerablemente mayor en condiciones de falla, que el de condiciones normales, y una separación clara puede ser establecida.

Otro resultado notable es que en la banda de frecuencia 0-0.9 CF en la aceleración transversal se separaron claramente las condiciones normal y de falla en las tres mezclas de combustible a 1500 y 1700 rpm, pero no a 2000 rpm, con las características de valor máximo, rms, media aritmética, desviación estándar y energía. Todas las otras características en todos los diferentes dominios probados arrojaron resultados insatisfactorios ya que o no mostraban diferencia alguna o solo lo hacían en condiciones específicas (sólo a una velocidad y un solo combustible).

Inesperadamente, las características estadísticas extraídas de la señal de vibraciones verticales lograron diferenciar las condiciones normal y de falla en las tres velocidades probadas como puede verse en la figura 7. Los mejores resultados se obtuvieron en la banda de frecuencia 0-0,9 CF, pero solo el valor máximo logró separar las condiciones normal y de falla en las tres velocidades y los tres combustibles probados. Estos resultados muestran que el valor máximo en la banda 0-0,9 CF son considerablemente más bajos en condiciones de operación normal, que aquellos de la condición de falla de *misfire* simulado, en los parámetros de prueba dados (sin carga, 1500, 1700 y 2000 rpm, motor de cuatro cilindros). Todas las otras características en todos los dominios probados arrojaron resultados insatisfactorios.

Al igual que con la comparación de la transformación en el dominio de la frecuencia, la señal de vibraciones longitudinales no proveyó diferencias significativas entre las condiciones probadas, o solo mostraba diferencias a ciertas velocidades y/o con ciertos combustibles.

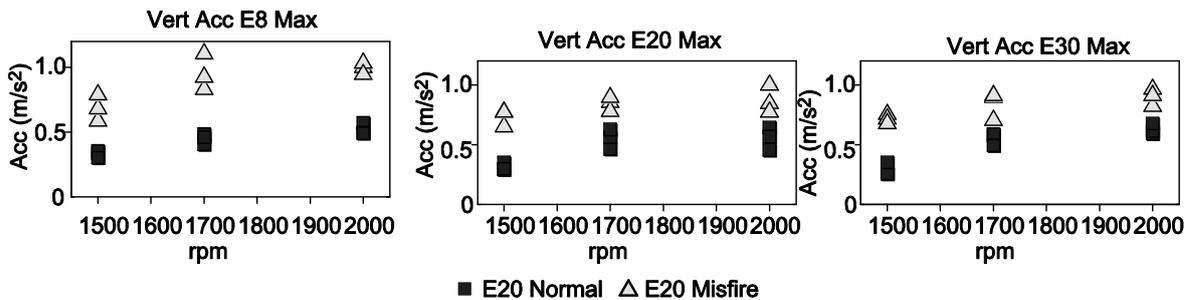


Fig. 7. Aceleración vertical, condiciones de operación normal y de falla en tres combustibles, valor máximo, 0-0,9 CF

## Discusión

En el análisis en el dominio de la frecuencia, las frecuencias excitadas durante la operación normal corresponden a la frecuencia de combustión (CF) y sus armónicos, resultados esperados debido a la forma en que el motor de combustión interna de cuatro tiempos funciona, y en este caso dado que es un motor de cuatro cilindros, corresponde a dos veces la frecuencia de revolución (RF), que también aparece en los análisis. De acuerdo con la literatura los picos esperados se presentan en CF y sus armónicos. La presencia del pico en RF en los resultados de las pruebas realizadas, evidencia un problema en el banco de prueba relacionado con desbalance de los componentes, en particular el dinamómetro acoplado al motor añade una inercia considerable, y podría ser la causa de los picos en RF. Lo mismo puede decirse de las pruebas con falla simulada, donde los componentes de frecuencia esperados, de acuerdo con la literatura, eran los picos en CF y sus armónicos con un nuevo pico mayor a los anteriores en 0,75 CF (debido a las nuevas condiciones no armónicas en la naturaleza de la vibración con solo tres de los cuatro cilindros operando y tres de cuatro combustiones en un período de dos ciclos), y dichos picos aparecieron en los resultados de este trabajo claramente pero el pico en RF se convirtió en aún más grande. La vibración no armónica se hizo evidente en los picos en 1,25 y 1,5 CF que estaban ausentes en operación normal del motor, y que también fueron reportados en la literatura.

A diferencia de los resultados obtenidos en trabajos previos como [14], en este trabajo se experimentó con el uso de combustibles diferentes a la gasolina pura para evaluar la validez del método bajo estas condiciones diferentes. La adición del etanol en la mezcla de combustible con gasolina provee características de combustión diferentes, en particular las diferencias en la velocidad y potencia de la combustión además las diferencias en condiciones de operación, al considerar la presencia de oxígeno adicional en la mezcla. Los resultados muestran que los mismos componentes de frecuencia excitados con gasolina pura en condiciones de falla son excitados al utilizar las tres mezclas etanol-gasolina probadas (E8, E20 y E30), aun considerando que el motor utiliza un carburador que no compensa por las condiciones del combustible. Además en el presente trabajo se realiza un aporte adicional al método con la extracción de características estadísticas en ciertas bandas de frecuencia que permiten una mejor clasificación de los resultados, facilitando la identificación de las condiciones de falla a partir del análisis de las señales, sin tener que recurrir a la inspección visual de los espectros.

La principal limitación del presente experimento se encuentra en la falta de un control más preciso de la velocidad de operación del motor, el cual fue realizado de forma manual mediante la manipulación del acelerador, lo cual genera resultados con mayor variación, en particular al utilizar el dominio de la frecuencia

## Conclusiones

Se realizó un ensayo experimental, en el cual se aplicaron problemas de operación simulados a un motor de combustión interna, de encendido por chispa, utilizando diferentes mezclas etanol-gasolina como combustible, para recolectar información de cuatro sensores principalmente: *Encoder* y tres acelerómetros (vertical, transversal y longitudinal).

En el análisis tiempo frecuencia de las señales obtenidas, se identificaron los componentes de frecuencia que diferencian la condición de operación del *misfire* en cada una de las mezclas consideradas. Estos picos característicos se encontraron en la señal en dirección transversal.

Las señales de vibración no mostraron diferencias claras entre las tres mezclas de combustible probadas.

La extracción de las características estadísticas de las señales obtenidas, y analizadas en varias bandas en el dominio de la frecuencia, permitió la comparación cuantitativa de las condiciones de operación normal y de falla en las tres velocidades y en las tres mezclas de combustible probadas.

Las vibraciones longitudinales no proveyeron diferencias significativas entre las condiciones con los análisis aplicados, solo funcionando en condiciones muy particulares.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias por su apoyo a través de los programas Joven Investigador 2014 y convocatoria 669-2014, que financiaron, respectivamente, los proyectos Determinación de la condición de operación de máquinas industriales por medio del análisis de vibraciones. Casos de estudio: motores de combustión de interna y máquinas hidráulicas y Diseño y desarrollo de un sistema prototipo en línea para el diagnóstico de motores de combustión interna diesel en servicio con base en vibraciones mecánicas. Aplicación a los sistemas de transporte público masivo, mediante Contrato FP 44842 - 161 -2005 que hicieron posible este trabajo.

## Referencias

- Porteiro J, Collazo J, Patiño D, et al. Diesel engine condition monitoring using a multi-net neural network system with noninvasive sensors. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(17-18):4097-105. ISSN 1359-4311.
- Eyidogan M, Necati Ozsezen A, Canakci M, et al. Impact of alcohol-gasoline fuel blends on the performance and combustion characteristics of an SI engine. *Fuel*. 2010;89(10):2713-20. ISSN 0016-2361.
- Babazadeh Shayan S, Seyedpour SM, Ommi F, et al. Impact of Methanol-Gasoline Fuel Blends on the Performance and Exhaust Emissions of a SI Engine. *International Journal of Automotive Engineering*. 2011;1(3):219-27. ISSN 2008-9899.
- Chandroth GO, Sharkey AJC, Sharkey NE. Cylinder pressures and vibration in internal combustion engine condition monitoring. In: *Comadem 99 12th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*; Sunderland, United Kingdom: University of Sunderland; 1999.
- Tagliatalata F, Lavorgna M, Mancaruso E, et al. Determination of combustion parameters using engine crankshaft speed. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013;38(2):628-33. ISSN 0888-3270.
- Charchalis A, Dereszewski M. Processing of Instantaneous Angular Speed Signal for Detection of a Diesel Engine Failure. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013;20(13):7. ISSN 1563-5147. DOI 10.1155/2013/659243.
- Jiang R, Yan X. Condition monitoring of diesel engines. In: *Complex System Maintenance Handbook*. London, UK: Springer London; 2008.
- Antoni J, Daniere J, Guillet F. Effective vibration analysis of IC engines using cyclostationarity. Part I – A methodology for condition monitoring. *Journal of Sound and Vibration*. 2002;257(5):815-37. ISSN 0022-460X.
- Arnone L, Boni M, Manelli S, et al. Block Vibration Measurements for Combustion Diagnosis in Multi-Cylinder Common Rail Diesel Engine. *SAE Technical Paper*. 2009 (2009-01-0646):8. ISSN 0148-7191. DOI 10.4271/2009-01-0646.
- Arroyo J, Muñoz M, Moreno F, et al. Diagnostic method based on the analysis of the vibration and acoustic emission energy for emergency diesel generators in nuclear plants. *Applied Acoustics*. 2013;74(4):502-8. ISSN 0003-682X.
- Vulli S, Dunne JF, Potenza R, et al. Time-frequency analysis of single-point engine-block vibration measurements for multiple excitation-event identification. *Journal of Sound and Vibration*. 2009;321(3-5):1129-43. ISSN 0022-460X.
- Li Y, Tse PW, Yang X, et al. EMD-based fault diagnosis for abnormal clearance between contacting components in a diesel engine. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010;24(1):193-210. ISSN 0888-3270.
- Wang X, Liu C, Bi F, et al. Fault diagnosis of diesel engine based on adaptive wavelet packets and EEMD-fractal dimension. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013;41(1-2):581-97. ISSN 0888-3270.
- Ben Ari J, de Botton G, Itzhaki R, et al. Fault detection in internal combustion engines by the vibration analysis method. *SAE Technical Paper* 1999. ISSN 0148-7191. DOI 10.4271/1999-01-1223.