

# DIAGNÓSTICO DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LAS OSCILACIONES DEL BLOQUE

---

VICENTE MACIÁN MARTINEZ  
BERNARDO TORMOS  
PABLO OLMEDA GONZALES  
*Departamento de Máquinas y Motores Térmicos  
Universidad Politécnica de Valencia. España*

JORGE LUIS CHACÓN VELASCO  
*Escuela de Ingeniería Mecánica  
Universidad Industrial de Santander  
jchacon@uis.edu.co*

## RESUMEN

*En este artículo se presenta una técnica no intrusiva, pensada para el Mantenimiento Predictivo de motores de combustión interna alternativos (MCIA), basada en el análisis de las oscilaciones del bloque suponiendo el motor como un cuerpo rígido soportado por resortes elásticos. Estas consideraciones permiten la determinación aproximada del par instantáneo del motor, utilizando única y exclusivamente un acelerómetro instalado en un punto del bloque lo más alejado posible del cigüeñal y registrando la señal temporal de varios ciclos termodinámicos. Las señal así obtenida puede informar acerca de diferentes tipos de fallos, especialmente aquellos relativos al diferente comportamiento entre los cilindros.*

*Se utilizó un sencillo modelo físico para estimar el comportamiento del motor bajo diferentes condiciones de funcionamiento. El modelo ha sido validado a través de la realización de diferentes medidas experimentales tanto en banco de ensayos de motor como en motores en servicio. Asimismo se han realizado diferentes ensayos para analizar la influencia de la posición del acelerómetro en el bloque.*

*El objetivo final del estudio es determinar límites de alerta y alarma de ciertos fallos en el motor, como puede ser la inyección o combustión anormal en uno o varios cilindros. Para ello se hace necesario el análisis tanto en el dominio temporal como en el de frecuencia, diferencia importante con el resto de técnicas utilizadas para el diagnóstico de maquinaria a través de vibraciones.*

**PALABRAS CLAVE:** Diagnóstico, combustión, motores Diesel, vibraciones.

## INTRODUCCIÓN

Durante el funcionamiento de un MCIA pueden aparecer un gran número de fallos, como defectos en el sistema de inyección, pérdidas de compresión, anomalías en el sistema de arranque, fallos mecánicos como holguras entre las camisas y los pistones o entre rodamientos y ejes, etcétera. Existen dos métodos para la identificación de estos fallos: los métodos directos y los indirectos.

En los últimos años, han sido desarrolladas y validadas un gran número de técnicas de mantenimiento basadas en la condición.

Las principales diferencias entre estas técnicas con la técnica que se presenta en este trabajo son, fundamentalmente, la utilización de un solo acelerómetro para medir la aceleración tangencial del bloque del motor, la sencillez del modelo físico empleado y el análisis de la señal tanto en el dominio temporal como en frecuencia. La técnica propuesta ha sido validada con resultados experimentales, indicando que puede ser útil para la detección de ciertas anomalías.

### MODELO FÍSICO

Los MCIA son máquinas que debido a su principio de funcionamiento transmiten fuerzas alternativas a través de sus apoyos. Dichas fuerzas se originan por dos causas diferentes: por una parte, el desequilibrio dinámico que producen las masas con movimiento alternativo y, por otra, el carácter discontinuo o pulsante del par característico de este tipo de motores. Las primeras pueden disminuirse notablemente con un correcto equilibrado del motor.

El par pulsante sobre el cigüeñal provoca que éste gire con una velocidad de rotación irregular. Asimismo, este par es transmitido a la carga y, además, el bloque motor lo transmite como reacción a los apoyos (necesarios para evitar la transmisión de vibraciones a la cimentación o al bastidor de los motores), lo que origina un movimiento oscilatorio. Estas oscilaciones dependen de la distribución de masas, el número de cilindros, la elasticidad de los apoyos y las condiciones de funcionamiento del motor (carga, velocidad o diferencia de comportamiento entre cilindros).

El modelo físico propuesto por Macian[3], que tiene en cuenta las características del sistema formado por el motor y los apoyos expuesto en los párrafos anteriores, permite tanto el estudio de las oscilaciones del bloque como su relación con el funcionamiento del mismo.

En primer lugar, se supondrá que el motor está montado de tal forma que oscila alrededor de un eje que es paralelo al cigüeñal y pasa por su centro de gravedad. La Figura 1 muestra una configuración de este tipo.

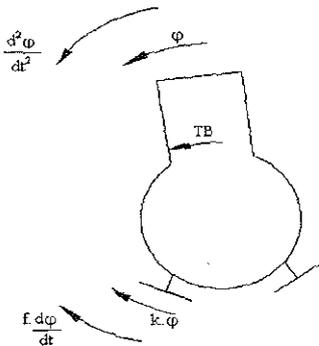


Figura 1. Modelo Físico

Estas oscilaciones del bloque motor pueden medirse colocando un acelerómetro lo más lejos posible del eje de oscilación y transversalmente al mismo, de manera que se obtenga la aceleración tangencial de ese punto que es proporcional a la oscilación del bloque. La ecuación del movimiento del sistema puede extraerse de la Figura 1:

$$T_B - k \cdot \varphi - f \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \cdot I_B \quad (1)$$

Donde,  $T_B$  es el par actuante sobre el bloque (reacción del par sobre el cigüeñal),  $k$  es la constante elástica,  $f$  es la constante de amortiguamiento,  $\varphi$  es el ángulo de oscilación e  $I_B$  es el momento de inercia del bloque.

Los apoyos se eligen de forma que la frecuencia de excitación sea bastante superior a la frecuencia natural de oscilación, para lo que la constante elástica  $k$  debe ser pequeña, de esa forma la amplitud de la oscilación  $\varphi$  también será pequeña, si además se supone que la constante de amortiguamiento es de un valor bajo y que el momento sobre el bloque es la reacción del momento sobre el cigüeñal, la Ecuación (1) quedaría:

$$T_C \cong T_B \cong \frac{d^2\varphi}{dt^2} \cdot I_B \quad (2)$$

Donde  $T_C$  es el par sobre el cigüeñal.

Puede observarse que, bajo ciertas condiciones, la aceleración angular del bloque es proporcional al par generado por el motor (incluyendo las fuerzas de inercia). Sin embargo, esta aproximación sólo es válida cuando el motor opera con simetría entre los cilindros [3],

### VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

En este apartado, se presentan los resultados de aplicar la técnica descrita en el punto anterior. Se realizaron dos estudios diferentes pero complementarios. En primer lugar, se determinó la influencia de la posición del acelerómetro en el bloque y, posteriormente se exploró el potencial de la técnica como herramienta de diagnóstico.

#### A. Influencia de la posición del acelerómetro en el bloque.

El estudio realizado para determinar la influencia de la posición del acelerómetro en la calidad del diagnóstico, así como para tener una mayor comprensión de la dinámica del movimiento, se llevó a cabo en un motor Diesel de seis cilindros y cuatro tiempos (127 kW/2000 rpm), típico de automoción montado sobre el vehículo. Como señal de referencia se utilizó la señal obtenida con una pinza piezoeléctrica colocada sobre el tubo de inyección 1. Se escogieron veinte puntos de medida sobre el bloque motor (mostrados en la Figura 2) para determinar el eje real de rotación del bloque, haciendo girar al motor en vacío (450 rpm).

Los objetivos fundamentales eran validar la precisión del modelo físico en aplicaciones reales y determinar el eje real de rotación del bloque para seleccionar el mejor punto de medida para la realización del diagnóstico. Para minimizar el ruido de la señal se realizaron cien medidas en cada uno de los puntos y se obtuvo su media. Se presentan únicamente los resultados obtenidos para el cilindro 1.

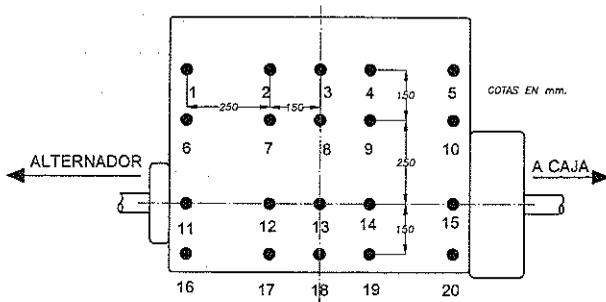


Figura 2. Posiciones del acelerómetro en el bloque motor.

B. Resultados para el cilindro Numero 1

El primer paso para determinar el eje de rotación es cuantificar los saltos relacionados con la combustión de cada uno de los cilindros y en las diferentes posiciones elegidas. Para ello, se calcula el valor medio de la magnitud de los saltos de todos los cilindros.

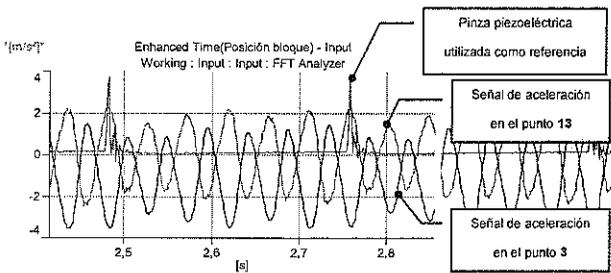


Figura 3. Señal de aceleración para dos puntos con diferentes signos

La Figura 3 muestra medidas en dos puntos diferentes, observándose tanto las diferencias en la magnitud del salto como en el signo del mismo. Se ha observado que la magnitud del salto disminuye del punto 1 al 10 hasta que se alcanza un punto del eje real de oscilación y la misma magnitud crece con diferente signo desde el punto 11 al 20 (véase la Figura 3). Este fenómeno se puede explicar si se supone que el eje real de oscilación se encuentra entre las líneas 6-10 y 11-15 y ligeramente inclinado respecto al cigüeñal.

El siguiente paso consistió en calcular la posición del eje real de oscilación, para lo cual se estudió la evolución de los saltos de todos los cilindros en líneas perpendiculares al cigüeñal (formadas por cuatro puntos). De este modo, se puede determinar el eje real de oscilación. La Figura 4 muestra los cambios en la magnitud de los saltos de aceleración para el cilindro 1 en las líneas 1-16 y 2-17 (Figura 3).

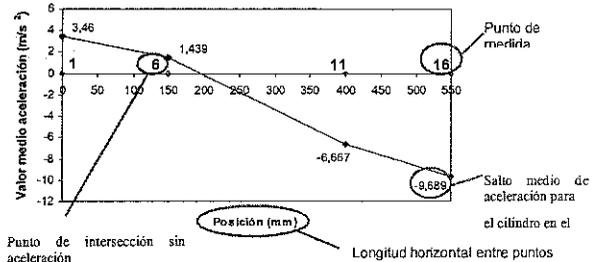


Figura 4. Saltos medios para los puntos 1-6-11-16

Se ha hallado que el eje de oscilación se encuentra situado entre las líneas 6-10 y 11-15. Las distancias medidas son perpendiculares al cigüeñal y tomadas de la línea 6-10 a la línea 16-20. La Figura 5 muestra este resultado y confirma la hipótesis realizada de que el eje de oscilación se encuentra ligeramente inclinado respecto al cigüeñal.

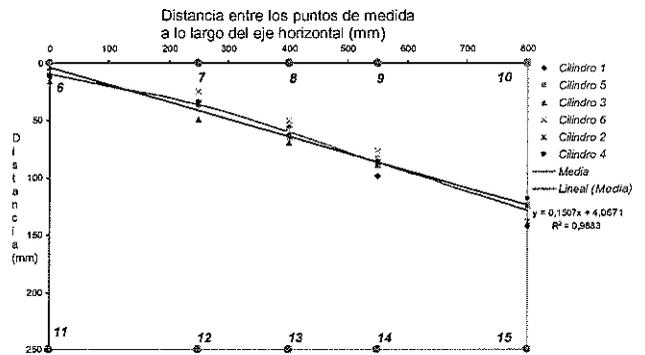


Figura 5. Posición aproximada del eje de oscilación

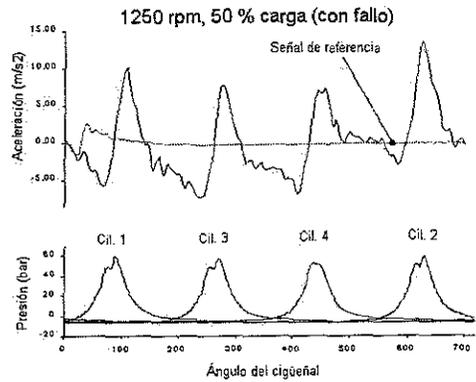
C. Aceleración angular

El potencial como herramienta de diagnóstico de la técnica expuesta en este trabajo se explora a través del análisis de los resultados obtenidos en un motor Diesel de cuatro cilindros y cuatro tiempos (101 kW/4000 rpm) que se ensayó bajo diferentes regímenes de rotación y cargas y bajo condiciones de funcionamiento correcto como con fallos provocados en uno de los cilindros (cilindro número 4). Para ello, se cambió el tipo de inyector de este cilindro, pasando de uno con ocho orificios a otro con tan sólo dos, consiguiendo una menor aportación de combustible. El análisis se realizó tanto en el análisis temporal como en el dominio de frecuencia.

**D. Análisis temporal**

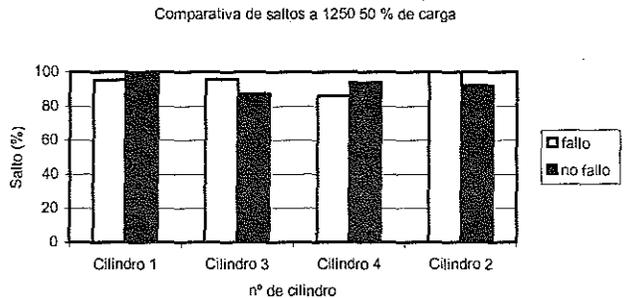
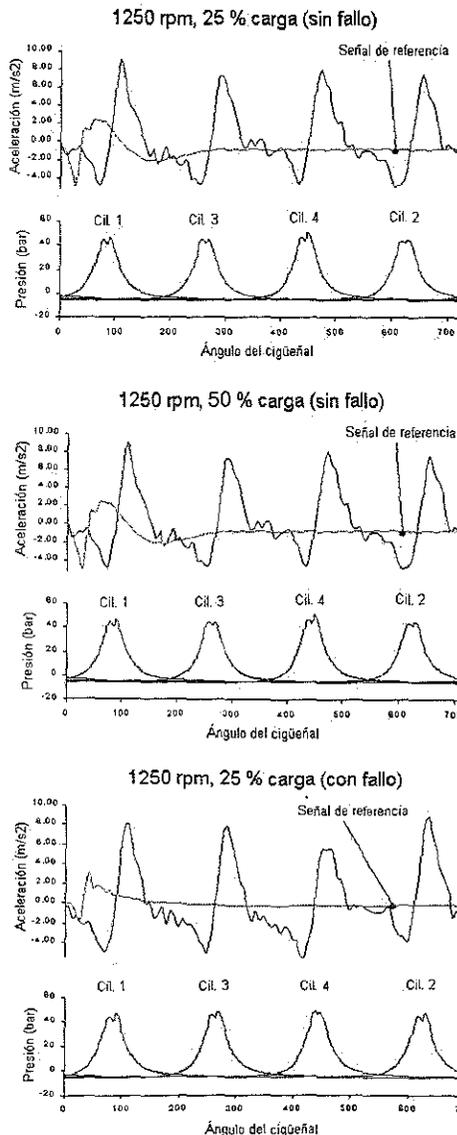
La Figura 6 muestra la aceleración tangencial y los diagramas de presión en cámara a 1250 rpm con diferentes cargas (25 % y 50 %). Aunque la señal de aceleración no es similar a la de par cuando existe un fallo, no significa que no se pueda extraer información de aquélla. La diferencia en aceleración entre un pulso de compresión y otro de combustión de un cilindro da una idea aproximada de la eficiencia de la combustión en ese cilindro.

Este criterio, aunque es aproximado, permite detectar ciertos fallos sobretodo aquellos relacionados con una falta de combustión. Cuando los fallos no son tan drásticos y ocurren en más de un cilindro la interpretación de la señal de aceleración es más difícil.



**Figura 6:** Aceleración tangencial y diagramas de presión medidas con funcionamiento correcto del motor y con fallos en uno de los cilindros.

El aumento de la velocidad de rotación provoca un aumento en dichas fuerzas, con lo que la señal de aceleración es difícil de interpretar ya que se hace complicado distinguir claramente los pulsos causados por la combustión en cada uno de los cilindros. En la Figura 7 se muestran los saltos medios obtenidos para una misma velocidad y diferentes cargas del motor.



**Figura 7.** Comparación entre los saltos de aceleración a diferentes rpm y cargas.

**E. Análisis en frecuencia**

El espectro de la señal de aceleración permite ver la existencia de un fallo rápidamente. De hecho, la presencia de armónicos por debajo de la frecuencia de encendido indica un comportamiento asimétrico entre los cilindros. La Figura 8 muestra la diferencia entre los espectros bajo dos condiciones de funcionamiento diferentes con o sin fallo provocado. El primer armónico coincide con la frecuencia de encendido ( $f_{en}$ ) (41,67 Hz, 1250 rpm). En el espectro de la señal obtenida con fallo provocado, se observa la aparición de un subarmónico a  $1/4$  de esta frecuencia, lo que indica el fallo de combustión en el motor. Con este análisis no es posible identificar ni el tipo de fallo ni en qué cilindro se produce.

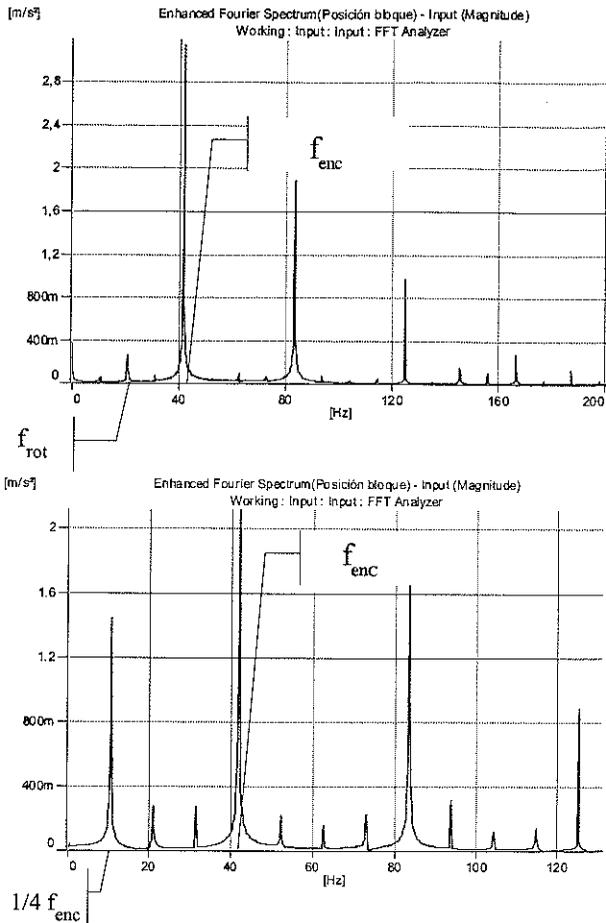


Figura 8. Espectro de las señales de aceleración a . sin fallo b. con fallo provocado a 1250 rpm y 50 % de carga.

### CONCLUSIONES

Las conclusiones que se extraen del trabajo realizado son:

El análisis de motores de combustión interna alternativos mediante las oscilaciones del bloque como cuerpo rígido ha demostrado ser una técnica sencilla para el diagnóstico de algunos fallos.

En ciertos casos prácticos, puede ser suficiente analizar la señal temporal. Cuando los fallos que se producen no son muy drásticos y ocurren en más de un cilindro, la señal de aceleración es más difícil de interpretar.

A lo largo del estudio el movimiento del bloque motor se ha supuesto como una rotación pura, aunque cierto movimiento de translación existe. El eje de rotación ha sido determinado experimentalmente y se ha observado que se encuentra ligeramente inclinado respecto al cigüeñal.

El diagnóstico se realiza de forma más fiable cuando el motor gira a bajas revoluciones y con carga parcial.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] P.M. AZZONI, G. CANTONI, G. MINELLI and D.MORO "Indirect pressure measurement in a small Diesel engine" *Ricerca e sviluppo*, April 1994, vol. 47, n° 4.
- [2] K. LIDA, K. AKISHINO and K. KIDO "IMEP Estimation from Instantaneous Crankshaft Torque". S.A.E. Paper N° 900617.
- [3] MACIAN V, LERMA M J and BARILÁ D. "Condition Monitoring of Thermal Reciprocating Engines Through Analysis of Rolling Block Oscillations". SAE Paper No 980116. (1998)
- [4] G.F. MAUER and R.J. WATTS. "On-Line Cylinder Diagnostics on Combustion Engines by Noncontact Torque and Speed Measurements". SAE Paper 89 0485.
- [5] S. F. REZEKA and N. A. HENEIN "A Diagnostic Technique for the Identification of Misfiring Cylinder(s)". S.A.E. Paper N° 870546.
- [6] G. RIZZONI. "Estimate of Indicated Torque form Crankshaft Speed Fluctuations": A model for the dynamics of the IC Engine", in *IEEE Trans. Veh. Technol.*, VolVT-38. N°3, Aug. 1989.