

## **APLICACION DE LA INTENSIMETRIA ACUSTICA A LA DETECCION Y LOCALIZACION DE ANOMALIAS EN EL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA ALTERNATIVO**

Jiménez E. A., F<sup>co</sup>; Valderrama G., F<sup>co</sup>; Muñoz B., A.; Sánchez L., T.

Grupo de Máquinas y Motores Térmicos. Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos. E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad de Sevilla.  
Avda. Reina Mercedes S/N. 41012 Sevilla. FAX: 95-462 92 05 / TLF: 95-455 70 00

### **INTRODUCCION.**

La diagnosis en máquinas (motores de combustión interna, cajas de engranajes, bombas, maquinaria de corte,...) se ocupa de la localización e identificación de anomalías en el funcionamiento de estas, originadas por las alteraciones de los procesos que evolucionan en ellas (c.g. el proceso de combustión en los m.c.i.a.), o bien por daños en los elementos que constituyen las máquinas (deformaciones excesivas, grietas, ...). Toda máquina en funcionamiento genera, además de las "salidas" para las que ha sido diseñada, una serie de señales de diversa naturaleza, como pueden ser de temperatura, vibroacústicas, ópticas, ... de forma que tratadas adecuadamente permiten identificar un proceso, obtener una característica de la máquina o bien clasificar diversos fallos de la misma.

Estas señales son captadas a través de sensores, como pueden ser acelerómetros y micrófonos en el caso de las señales vibroacústicas. El objeto del presente trabajo es mostrar las ventajas, inconvenientes y aplicaciones encontradas en la captación y tratamiento de las señales de vibración y ruido captadas con acelerómetros y micrófonos en los ensayos llevados a cabo en un motor de encendido por chispa de 1300 cm<sup>3</sup> de 4 cilindros en línea de aspiración natural.

### **DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO**

En la experiencia realizada se pretendía ver la sensibilidad de las técnicas empleadas para diferenciar entre diversas condiciones de funcionamiento del motor. Estas fueron:

**ID** : 2000 RPM / PAR ~ 1.0 Nm / "Gap" electrodos bujías 0.7 mm (Normal)  
**C1** : 2000 RPM / PAR ~ 29.0 Nm / "Gap" electrodos bujías 0.7 mm (Normal)  
**F1** : 2000 RPM / PAR ~ 29.0 Nm / "Gap" electrodos bujías 1.4 mm (cilindro 2)  
**F2** : 2000 RPM / PAR ~ 29.0 Nm / "Gap" elect. bujías 1.4 mm (cil. 2) y 0.15 mm (cil. 4)

Para las medidas de ruido se utilizó la técnica de la intensimetría acústica. Se cubrió la tapa de balancines del motor con una malla formada por 50 celdas, de forma que la distancia equidistante entre puntos de medida contiguos fue de 3 cm, y la distancia media entre el plano de medida y la superficie de la tapa de balancines fue de 6 cm. Simultáneamente se pegaron con cianocrilato (para no falsear la medida a frecuencias elevadas) en cuatro puntos de la tapa cuatro acelerómetros iguales, con un rango de medida que desde 2 Hz hasta 10 KHz presentan una desviación < 5 % y una frecuencia de resonancia de 45 KHz.

Tanto las medidas por intensimetría como las de aceleración se realizaron con un analizador B&K modelo 2133. El análisis se realizó en doceavos de octava, buscando obtener la mayor resolución posible de los registros de aceleraciones/velocidades, ya que los sólidos presentan una baja densidad modal  $1/l$ , y por ello, a bajas frecuencias pueden mostrar un contenido en frecuencias muy discriminatorio.

## EMPLEO DE LA INTENSIMETRIA ACUSTICA

Para las medidas por intensimetría se empleó una sonda P-P, de micrófonos enfrentados, con espaciador de 12 mm B&K y tiempo de muestreo por punto de 1.04 minutos, suficiente para que los niveles observados de intensidad activa mostraran valores estacionarios. Como el equipo presenta un error máximo por mal emparejamiento de fase de  $0.1^{\circ}$  para frecuencias mayores a 224 Hz, se necesita un PI index por celda y frecuencia ( $L_{PI} = 10 \text{ Log}(P) - 10 \text{ Log}(I)$ ); siendo P la presión e I la intensidad activa medida en la dirección del eje de la sonda, ambas promediadas en el tiempo) menor de 10 dB, para que el error máximo de medida en las frecuencias extremas no supere 1 dB (Precisión ingenieril). Esto nos proporciona un rango de frecuencia útil entre 400 Hz y 5 KHz. Analizando los valores  $L_{PI}$ , encontramos que solo algunas bandas por debajo de 1 KHz (516 Hz y 729 Hz) presentan valores válidos (para todas las celdas), mientras que para frecuencias superiores a los 1000 Hz (1.15 KHz - 5.46 KHz), ninguna supera el valor límite, situándose principalmente en valores muy inferiores, lo que aumenta la precisión de la medida en este rango.

El efecto del elevado  $L_{PI}$  a bajas frecuencias solo se explica por la baja eficiencia que muestran cuerpos radiantes poco rígidos y de superficies preponderantemente planas, como resulta ser la tapa de balancines del motor ensayado (chapa embutida de 1 mm de espesor), que genera un campo cercano muy reactivo /2/. Es oportuno hacer referencia a las medidas realizadas en la misma celda de ensayo (semianecoica) /3/, sobre un motor diesel (de estructura mucho más rígida, sin chapas ni cuerpos principalmente planos), donde se utilizó la técnica de intensimetría acústica para medir la potencia sonora emitida por el motor, y donde el valor  $L_{PI}$  no sobrepasó los 10 dB en ninguna de las bandas de frecuencias analizadas.

## ANALISIS DE RESULTADOS

Se procedió a la comparación de los registros de aceleraciones/velocidad obtenidos con los acelerómetros y de intensidad acústica, en las bandas de frecuencia que los valores de  $L_{PI}$  han permitido. Con objeto de sacar el mayor contenido de información posible de los fenómenos que se quieren estudiar, se analizaron las condiciones:

- \* **C1-ID** : En esta situación se puede ver que componentes del espectro se deben principalmente a la combustión, y cuales a la propia cinemática del motor, salvo los efectos dinámicos inducidos por la combustión, que se deben a dos causas fundamentales; una es el gradiente de presión que se origina durante la combustión, y otra son los impactos que se producen entre los elementos mecánicos, al ser acelerados estos por las fuerzas de inercia y de combustión a través de los juegos existentes entre las partes móviles.
- \* **C1-F1 ; C1-F2** : Se quiere observar aquí como los fallos provocados afectan al motor en condiciones de carga.

Las medidas de  $I_M = (1/N) \cdot \sum_{i=1}^N I(i)$  obtenidas para la suma de todas las bandas de frecuencia con  $L_{PI} < 10$  dB (solo 51.6 Hz, 729 Hz, 1.15 KHz-5.46 KHz), produce unos valores de **C1-ID**, **C1-F1**, **C1-F2** practicamente constantes para todas las celdas, con diferencias entre celdas contiguas inferiores a 0.5 dB y una dispersión  $\sigma < 0.5$  dB en todos los casos. Esta característica prácticamente uniforme para todas las celdas, que solo nos permite conocer el valor medio de la diferencia entre registros, no proporciona información relevante para los objetivos buscados de diagnosis. Por otra parte, hace inviable el uso de la Intensimetría acústica en la localización de posibles fuentes/sumideros de intensidad, asociados a posibles fallos, tal como se ha podido resolver de forma exitosa en documentadas ocasiones /2/, debido al carácter del campo generado. Por todo esto, se va a realizar el análisis en base a cada doceavo de octava, buscando las frecuencias que en función de su peso en los componentes principales /4,5/ son más significativas. Este análisis permite obtener para cada condición del motor (C1, F1, F2, ID) y a partir de la matriz de medida (columnas(20)  $\rightarrow$  frecuencia; filas(50)  $\rightarrow$  celdillas), las frecuencias que con mayor relevancia definen el campo de intensidad, y comparar así estas con los valores RMS de velocidad y aceleración de los acelerómetros. La Tabla 1 muestra los resultados en la condición C1-ID para las frecuencias más significativas, indicando el superíndice la importancia relativa de cada frecuencia.

La importancia de cada factor principal viene dada por el valor relativo del autovalor correspondiente, de forma que cuánto mayor sea este, menor error se comete en la sustitución del campo de medidas por su valor principal. En el caso C1-ID, se ha obtenido:

$$\lambda_1 = 22.9 \% / Y_1 = 0.871 \cdot I(1.45 \text{ K}) - 0.787 \cdot I(1.54 \text{ K}) + 0.741 \cdot I(1.22 \text{ K}) + 0.706 \cdot I(1.37 \text{ K})$$
$$\lambda_2 = 16.5 \% / Y_2 = 0.799 \cdot I(2.74 \text{ K}) - 0.569 \cdot I(1.22 \text{ K}) + 0.529 \cdot I(1.30 \text{ K}) - 0.527 \cdot I(2.05 \text{ K})$$

Cada factor principal, se forma por la suma ponderada de los valores de la intensidad para cada celdilla y en la frecuencia indicada, siendo las de mayor peso ( $|\bullet| \leq 1$ ) las que presentan un

coeficiente mayor (en valor absoluto).

Frecuencia Hz	Ac1(dB)	Ac2(dB)	Ac3(dB)	Ac4(dB)	I (ponderacion)
516	-0.3	-0.3	2.3 <sup>(IV)</sup>	5.6 <sup>(II)</sup>	-0.209
729	0.5	2.3	2.9 <sup>(II)</sup>	7.2 <sup>(I)</sup>	-0.424
1.22 K	0.1	1.9	-1.4	-0.2	0.741 <sup>(III)</sup>
1.37 K	-0.3	1.2	-0.1	1.9	0.706 <sup>(IV)</sup>
1.45 K	4.2 <sup>(II)</sup>	8.9 <sup>(II)</sup>	2.4 <sup>(III)</sup>	1.4	0.871 <sup>(I)</sup>
1.54 K	6.3 <sup>(I)</sup>	10.4 <sup>(I)</sup>	1.4	1.8	-0.787 <sup>(II)</sup>
1.63 K	3.1 <sup>(III)</sup>	6.6 <sup>(III)</sup>	2.9 <sup>(II)</sup>	0.5	0.00
1.73 K	2.4 <sup>(IV)</sup>	3.7 <sup>(IV)</sup>	3.4 <sup>(I)</sup>	0.9	0.00
2.44 K	1.1	0.3	1.1	4.4 <sup>(III)</sup>	0.366
2.59 K	-0.4	1.1	0	3.9 <sup>(IV)</sup>	0.023

Tabla 1

En la figura 1 aparecen representadas las curvas de nivel correspondientes a las intensidades medidas en la situación CI-ID. Si bien la comparación entre ellas deja ver la modificación que sufre el campo acústico, no permite la localización de fuentes acústicas. Los resultados obtenidos para las otras condiciones ensayadas, producen efectos similares: se observa claramente como se altera el campo de intensidad, pero no se pueden sacar conclusiones acerca de la localización de la anomalía provocada. Por otra parte, volviendo a los resultados de la tabla 1, podemos ver como las frecuencias más significativas para la intensidad acústica, se corresponden con los valores RMS de mayor magnitud para las posiciones AC1, AC2 y AC3, estando los valores más relevantes de AC4 en otras bandas de frecuencia. Además AC1 y sobre todo AC2, presentan no solo el mayor valor, sino un incremento sobre el valor medio que es máximo en estas frecuencias.

La importancia que la localización de cada acelerómetro presenta en la captación de vibraciones queda de manifiesto al observar la disparidad de valores en los rangos de frecuencia analizados para las distintas posiciones, observándose a veces los valores característicos a frecuencias muy diferentes, a pesar de existir una separación entre acelerómetros no mayor de 6 cm. Este estudio comparativo permite por tanto el empleo conjunto de la intensimetría acústica y las medidas de aceleración para localizar aquellas posiciones sobre el motor que se correspondan con los valores de intensidad más significativos, si lo que se busca es identificar las zonas causantes del mayor flujo de intensidad.

#### CONCLUSIONES FINALES

\* La técnica de la intensimetría acústica utilizada directamente, no es capaz de identificar cualquier fuente o sumidero asociado a fallos del motor. Los isocontornos observados a diferentes frecuencias muestran la alteración del campo, pero impiden la localización de la zona causante de la anomalía. Por otra parte, las características del campo generado hacen que las medidas de intensidad no sean válidas (elevada dispersión  $\Rightarrow L_p \geq 10$  dB, principalmente para frecuencias  $< 1$  KHz) en todo el rango de frecuencias, impidiendo un análisis completo y preciso por esta técnica.

\* El análisis realizado ha sido hecho para cada banda de frecuencia. El estudio del campo de intensidad atendiendo a la suma de los valores de I obtenidos en cada banda, no permite discriminar entre las diferentes condiciones ensayadas, es decir, los valores así obtenidos presentan un valor de  $I_M$  prácticamente igual por celdilla y por condición de ensayo.

\* En el trabajo realizado se muestra la aplicación de la intensimetría acústica como un discriminador de puntos de medida de aceleraciones, lo cual puede ser de gran importancia en un método de diagnóstico, donde se busque la localización óptima de los acelerómetros.

## REFERENCIAS

- /1/ R.H. Lyon. Machinery Noise and Diagnostics. Butterworths 1987.
- /2/ Fahy, F.J. Sound Intensity. Elsevier Applied Science 1989.
- /3/ Jiménez F.J. Contribución a la Reducción del Ruido Provocada por el Piston Slap. *Tecniaústica* 1992.
- /4/ Fukunaga. Introduction to Statistical Pattern Recognition. Academic Press 1990.
- /5/ C. Cempel. Vibroacoustic Condition Monitoring. Ellis Horwood 1991.

