

## **CONTROL ACTIVO DEL RUIDO DE ESCAPE DE UNA FUENTE ENCAPSULADA UTILIZANDO UNA REFERENCIA MULTIPLE**

REFERENCIA PACS: 43.50.Ki

María Cuesta y Pedro Cobo Parra  
Instituto de Acústica. CSIC.  
Serrano 144  
28006 Madrid  
e-mail: iaccr522@fresno.csic.es

### **SUMMARY**

This paper deals with the design and implementation of a passive-active system to reduce the exhaust noise radiated by a small generator. Unwanted noise is periodic with a fundamental frequency depending on the electrical load plugged in to the generator. Passive control is afforded by a rectangular enclosure. Active control system implemented is feedforward and adaptive. Two signals, provided by two accelerometers both over the filter case of the generator, and filtered in different bands, are used as reference.

### **INTRODUCCION**

El control activo del ruido (CAR) consiste en generar electrónicamente una señal en contrafase al ruido indeseado para producir interferencia destructiva entre los dos campos sonoros (Nelson y Elliott, 1992). Es efectivo únicamente a baja frecuencia por lo que en la práctica debe ser una técnica complementaria de los métodos pasivos tradicionales, con el fin de cubrir un mayor espectro del ruido. La eficiencia del control pasivo está determinada por el tamaño, peso y características absorbentes de los materiales utilizados, mientras que en control activo, el diseño del sistema acústico y la capacidad computacional disponible, son los factores decisivos. Un sistema CAR adaptativo debe incluir una fuente secundaria que genere la señal de control, un micrófono de error para adaptar el controlador y en caso de haber adoptado una estrategia feedforward, una señal de referencia que informe de las características del ruido primario. El controlador digital consta de una parte electrónica o hardware que integra una tarjeta DSP para el procesado digital de señales y una parte de control o software, que toma las señales de entrada, las procesa en el DSP y calcula las señales de salida (Cobo, 1997).

### **DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO**

El objetivo del presente trabajo es diseñar e implementar un sistema híbrido para control pasivo-activo del ruido de escape de un grupo electrógeno Honda EG 1900, que radia ruido periódico con frecuencia fundamental 32.5 Hz. El motor se ha situado en el interior de un encapsulamiento de acero, diseñado para aislar y absorber las frecuencias medias y altas (Beranek y Vér, 1992). Se han recubierto las paredes con material muy absorbente en altas frecuencias, e intercalado láminas antivibratorias entre los soportes del motor y el encapsulamiento. La Pérdida por Inserción medida con el método MLS (Cobo et al, 1998), es en promedio de 20 dB por encima de 500 Hz, ver Figura 1. Un silencioso ventilador centrífugo, situado en un extremo interior del encapsulamiento, extrae los humos calientes generados durante la combustión. Un regulador automático de temperatura limita el valor máximo alcanzable en el encapsulamiento. Sobre el tubo de escape, en configuración de rama lateral, se dispone



la fuente secundaria, un altavoz MOTRAN HTL6, capaz de soportar temperaturas superiores a 100°C. Para detectar la señal residual en el tubo de escape, se incorpora un micrófono de electrete FONESTAR 2214, recubierto por un tapón de latón de 0.5 mm de espesor que descende su sensibilidad hasta los niveles requeridos. La señal de referencia, coherente con el ruido de escape, es múltiple y está proporcionada por dos acelerómetros, ambos sobre el filtro de aire del motor. Se optimiza el sistema de control activo SISO implementado en un DSP TMS320C40 que integra los algoritmos FXLMS Y FULMS. Este dispositivo viene esquematizado en la Figura 2.

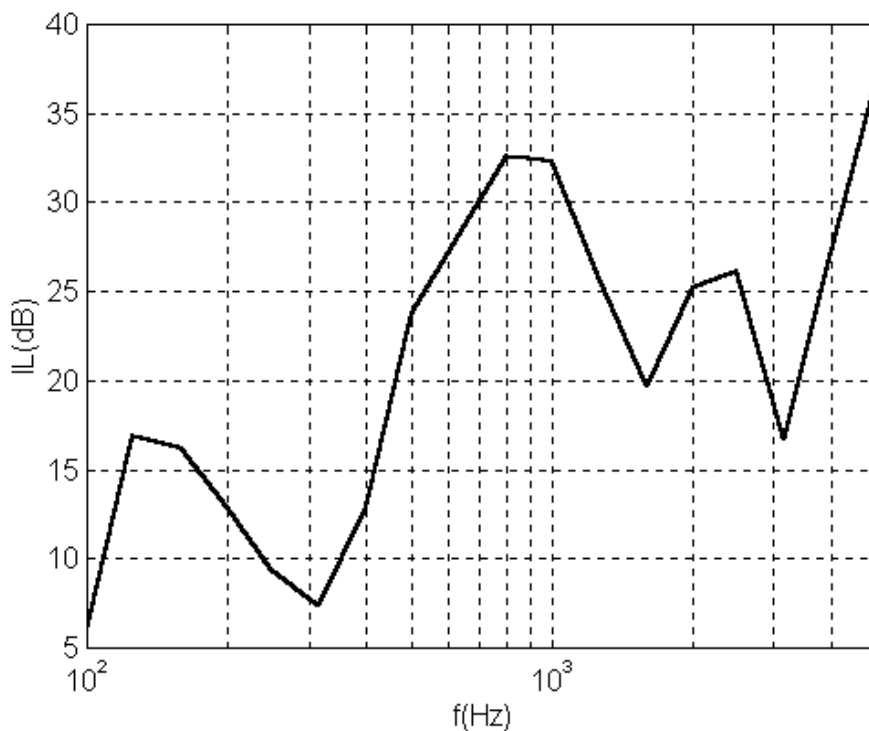


Figura 1. Pérdida por Inserción del encapsulamiento pasivo diseñado



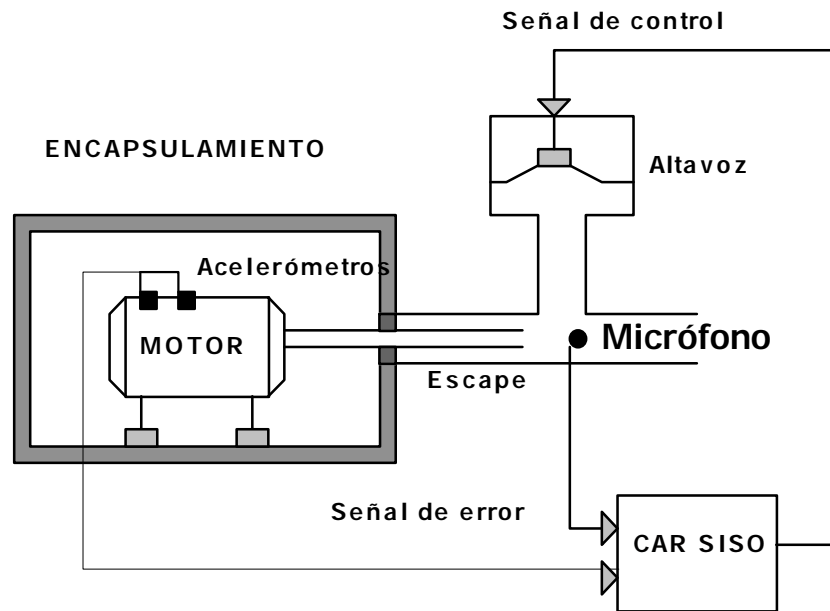


Figura 2. Descripción del sistema activo/pasivo implementado

## CONTROL ACTIVO DEL RUIDO DE ESCAPE CON UNA REFERENCIA

El objetivo del sistema diseñado es demostrar que utilizar una señal de referencia múltiple, escogida adecuadamente, permite mejorar los resultados de cancelación obtenidos con una sola señal (Cuesta y Cobo, 1999). Es necesario analizar previamente los resultados que se consiguen con una única señal de referencia.

La señal de referencia, en un sistema feedforward, informa de las características espaciales y temporales del ruido primario, de tal forma que el controlador a través de los filtros que implementa trata de generar una señal semejante pero desfasada, para producir cancelación en el punto donde se detecta la señal residual (Hansen y Snyder, 1997). Entre todas las señales de vibraciones analizadas, del soporte, del depósito de gasolina y del filtro de aire, es esta última la que se incorpora al sistema, por ser más coherente con el ruido de escape. La señal de las vibraciones del filtro de aire del motor, detectada por un acelerómetro B&K 4332 y preamplificada en un B&K 2651, entra como referencia en el controlador. Internamente se filtra en la banda 40-400 Hz con filtros Butterworth de orden 6, ver Figura 3. El fundamental,  $N=32.5$  Hz, no se tiene en cuenta por estar fuera del margen del altavoz. El primer armónico,  $2N=65$  Hz, es el armónico de mayor nivel del ruido de escape y también de la señal de las vibraciones captada por este acelerómetro.



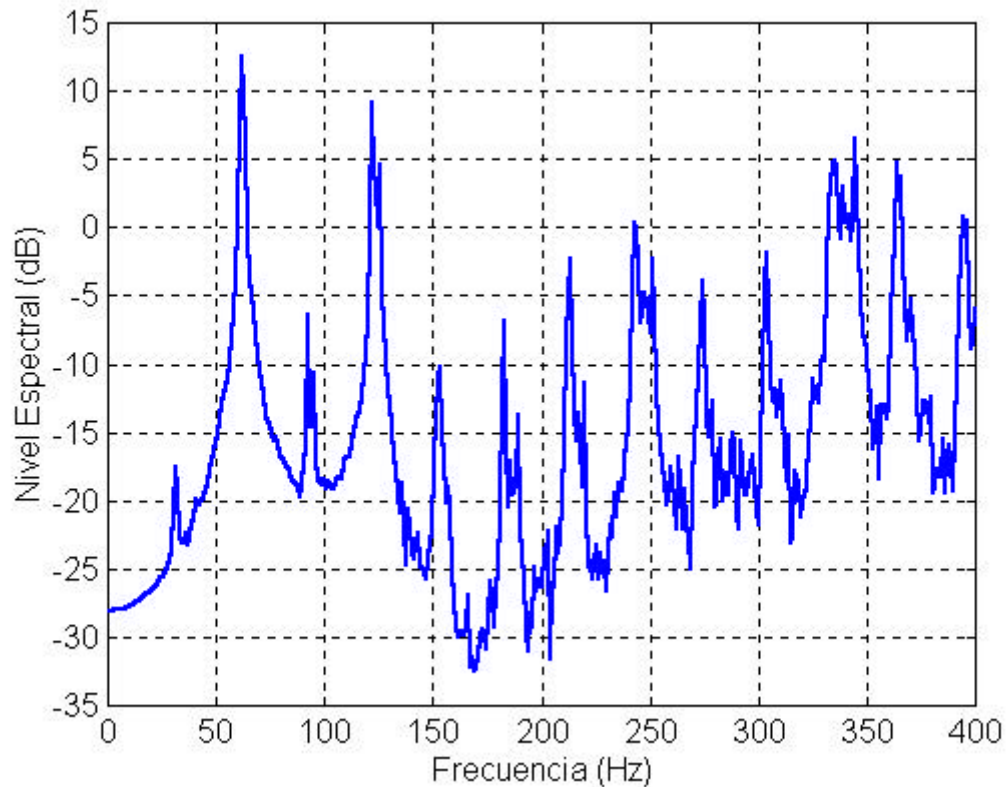


Figura 3. Señal de referencia del acelerómetro en la cubierta del filtro de aire, filtrada en (40, 400) Hz

El controlador se ha configurado con una frecuencia de muestreo de 2000 Hz y filtros antialiasing de orden 8 a 800 Hz. La señal de error se filtra internamente con filtros Butterworth de orden 6 en el margen 40-400 Hz. Los filtros de control son IIR con 60 coeficientes directos y coeficiente de convergencia 0.5, y en la parte recursiva, 50 coeficientes y convergencia 0.1. La identificación de la vía secundaria se efectúa con una señal aleatoria de amplitud 0.1 y filtros IIR con coeficientes 60 y 40 para la parte directa y recursiva, y factores de convergencia de 0.08 en ambas.

La Figura 4 muestra los espectros del ruido de escape en la banda estudiada, sin (azul) y con (rojo) sistema de control. Se aprecia un descenso generalizado de todos los armónicos, exceptuando el  $5N=162.5$  Hz que apenas varía. La mayor atenuación, cercana a 35 dB, corresponde al armónico de mayor nivel, 65 Hz. Seguidamente, están los picos  $3N=97.5$  Hz,  $4N=130$  Hz y  $8N=260$  Hz, que descienden cerca de 30, 25 y 20 dB respectivamente. A 195 Hz, el nivel espectral se atenúa unos 12 dB y las frecuencias restantes, se cancelan tan solo unos pocos dB. Se observa un ligero aumento de la componente continua entre 270 y 350 Hz. El nivel de presión sonora de la señal residual, detectado en un sonómetro disminuye también unos cuantos dB.



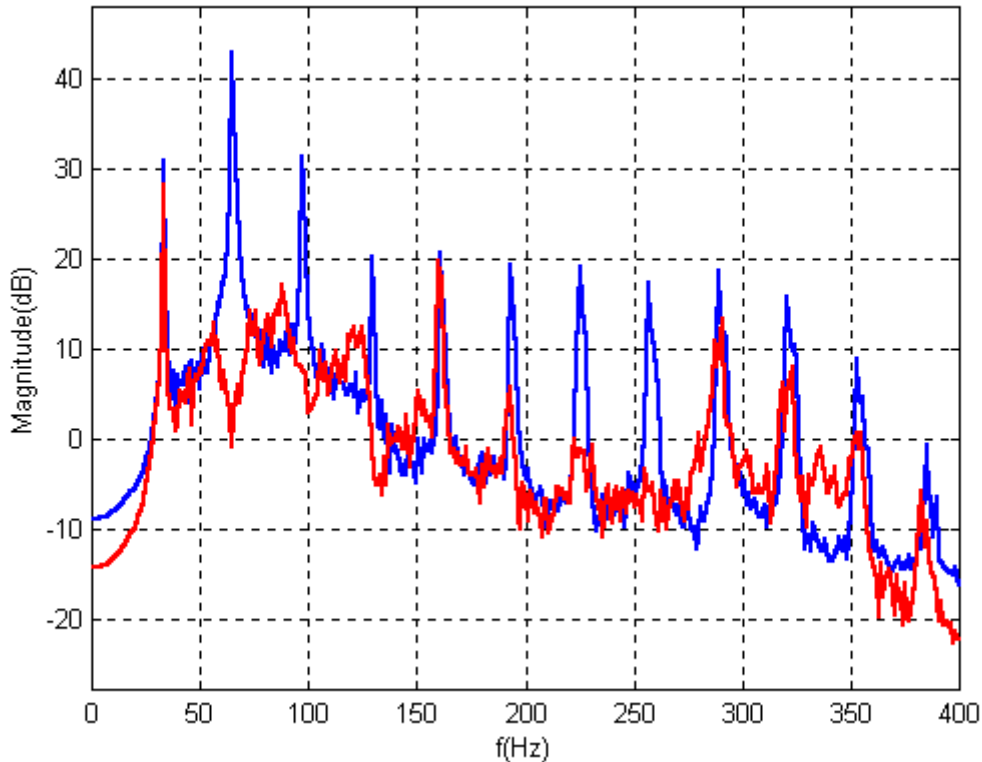


Figura 4. Ruido de escape, filtrado en (40, 400) Hz, con el sistema CAR desconectado (azul) y conectado (rojo)

## CONTROL ACTIVO DEL RUIDO DE ESCAPE CON DOS REFERENCIAS

El resultado anterior intenta mejorarse utilizando dos señales de referencia. Ha sido necesario determinar entre todas las señales de vibraciones cuales eran más adecuadas y en que bandas debían ser filtradas cada una, para ser lo más coherentes posible con el ruido de escape en el margen de frecuencia estudiado, entre 40-300 Hz. Los resultados más satisfactorios se han obtenido una vez más con las vibraciones del filtro. Cada una de las señales de referencia es detectada por un acelerómetro situado en el filtro de aire del grupo, y son filtradas internamente en bandas complementarias que cubran el margen en cuestión. La señal procedente del acelerómetro B&K 4370, es filtrada con Butterworth de orden 6 en la banda 40-150 Hz, ver Figura 5, mientras que la detectada en el B&K 2635 se filtra entre 100-300 Hz (Figura 6).

El sistema se configura con una frecuencia de muestreo algo superior, 2500 Hz y filtros antialiasing Butterworth de orden 8 a 500 Hz. La señal de error se filtra en la banda 40-400 Hz con IIR de orden 6. Los filtros de control son IIR con 100 coeficientes en la parte directa y recursiva y unos coeficientes de convergencia de 0.1 y 0.05 respectivamente. La identificación de la vía secundaria se efectúa con una señal MLS de amplitud 0.1 y filtros IIR con coeficientes 100 y 80 para la parte directa y recursiva, y factores de convergencia de 0.05 y 0.01 respectivamente.

La Figura 7 muestra los resultados de cancelación obtenidos en esta sección. En esta ocasión todos los armónicos, incluido el 5N=162.5 Hz que no experimentaba cambio en los resultados previos, han descendido en toda la banda en que se toma la señal de referencia, hasta los 300 Hz. El primer armónico, 65 Hz, sigue



experimentado la máxima atenuación, de nuevo próxima a los 35 dB. Los picos  $4N=130$  Hz,  $3N=97.5$  Hz, y  $8N=260$  Hz, descienden cerca de 30, 23 y 15 dB respectivamente. El resto de los armónicos, sin atender la banda 300-400 Hz que no se ve afectada, desciende en promedio 10 dB cada uno. El nivel de presión sonora detectado en el sonómetro disminuye en la misma proporción que antes. Se aprecia una mejoría en el resultado al descender el armónico de 162.5 Hz que permanecía intacto al utilizarse una única referencia.

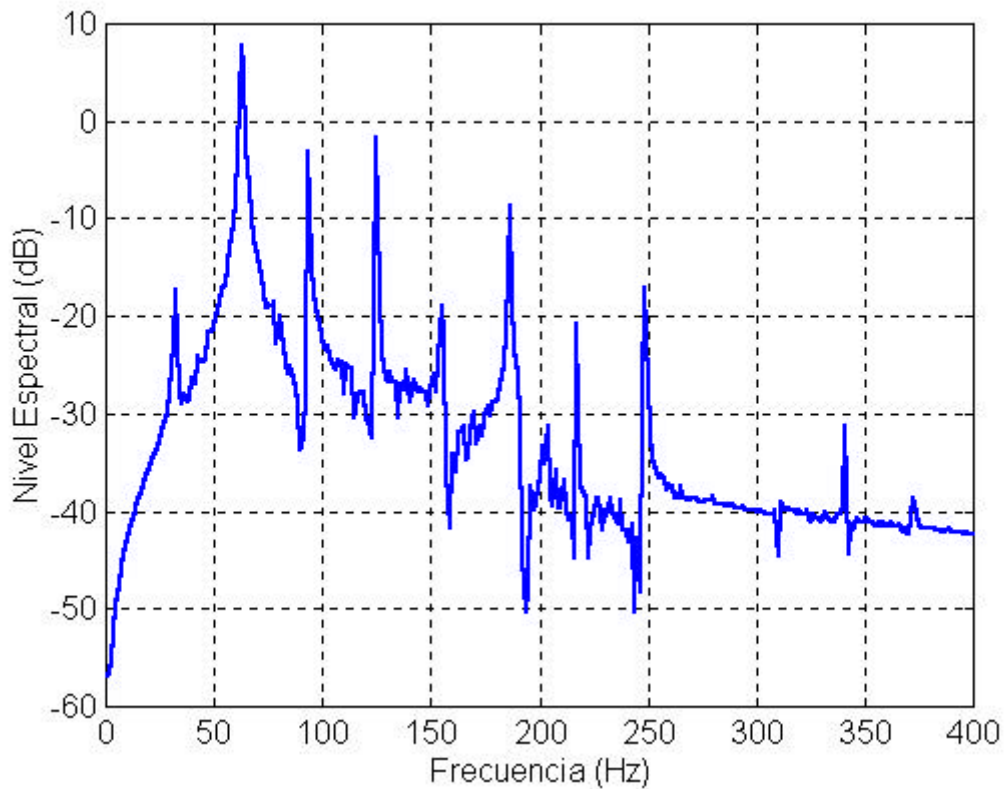


Figura 5. Referencia filtrada entre (40-150) Hz procedente del acelerómetro grande en el filtro de aire

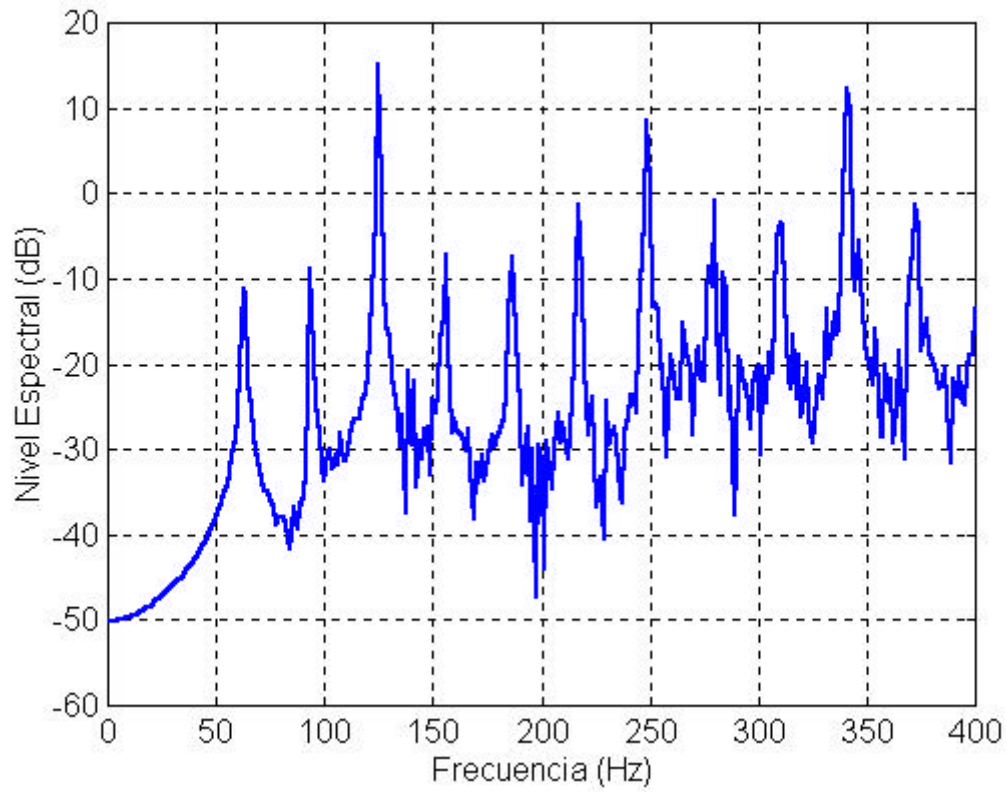


Figura 6. Referencia filtrada en (100-300) Hz procedente del acelerómetro mediano en el filtro de aire



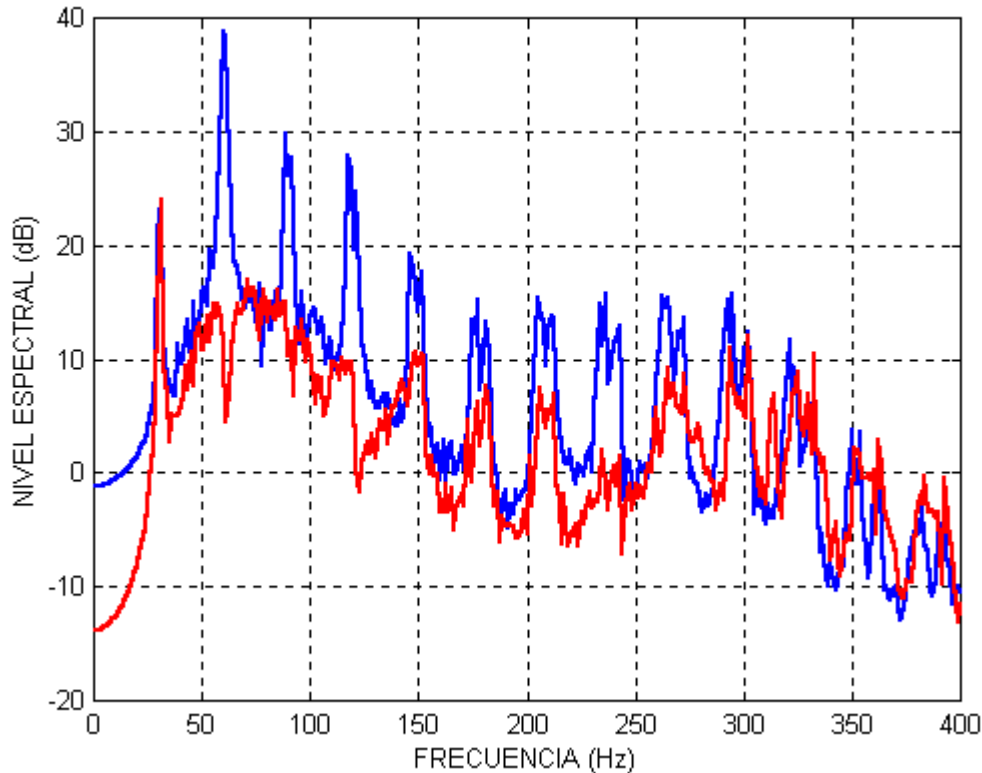


Figura 7. Ruido de escape, filtrado en (40, 400) Hz, con el sistema CAR desconectado (azul) y conectado (rojo) utilizando dos referencias, una entre (40-150) Hz y otra entre (100-300) Hz

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

El principal objetivo del trabajo ha sido diseñar e implementar un sistema de control híbrido para reducir el ruido de escape de una fuente encapsulada, utilizando dos señales de referencia. El encapsulamiento diseñado y construido garantiza el máximo aislamiento y absorción a frecuencias altas. El sistema de refrigeración, formado por el ventilador centrífugo y el regulador automático de temperatura, garantiza la buena combustión del motor y seguridad del sistema. Se optimiza un sistema de control activo monocanal para reducir el ruido de escape de baja frecuencia. Como señal de referencia se utilizan dos señales de vibración detectadas por dos acelerómetros en el filtro de aire del motor. Una se filtra en la banda 40-100 Hz y la otra en la de 100-300 Hz. Con esta referencia múltiple se consigue mejorar el espectro de cancelación obtenido con una sola señal de referencia, extendiéndose la cancelación a toda la banda estudiada, entre 40-300 Hz.





## REFERENCIAS

- Beranek, L.L. and Vér, I.L., *Noise and Vibration Control Engineering. Principles and Applications*, New York: John Wiley and Sons, 1992, ch 13.
- Cuesta, M, and Cobo, P., "A passive/active hybrid system for control of the noise radiated by a small generator", in Forum Acusticum 99, Berlin, Germany.
- Cobo, P., *Control Activo del Ruido. Principios y Aplicaciones*, Madrid: CSIC, Colección Textos Universitarios Nº 26, 1997.
- Cobo, P., Ranz, C., Santiago, J.S., Pons, J., Sigüero, M., and Delgado, C., *J. Acoust. Soc. Am.* **103**(5, Pt. 2) 3074 (1988)
- Nelson, P.A. and Elliott, S.J., *Active Control of Sound*, London: Academic Press, 1992.
- Hansen, C.H. and Snyder, S.D., *Active Control of Noise and Vibration*, London: E&FN Spon, 1997.

**AGRADECIMIENTOS:** Este trabajo ha sido realizado con el soporte financiero de la CICYT, Proyecto AMB97-1175-C03-01.

