

## MODELO DE IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE RUIDO

M.Dolores Redel-Macías

Antonio J. Cubero-Atienza

*Área de Proyectos de Ingeniería. Universidad de Córdoba.*

Paul Sas

Dries Berckmans

*Dt. Mechanical Engineering. Katholieke Universiteit Leuven*

### Abstract

An experimental model for identification of noise sources is present. The source strength distribution was obtained by inverting the transfer function matrix, between radiated acoustic pressure and volume velocity, using the 'pseudo-inverse' technique and applying SVD based regularisation strategies in order to prevent excessive measurement error amplification. Besides, the source reconstruction of each relevant part of the engine is modelled in terms of equivalent acoustical monopoles. An important practical advantage is that the use of monopoles as equivalent sources facilitates the transmission path quantification. Transfer functions between the various parts of the engine or transmission and the pass-by noise microphones are measured reciprocally.

Experimental results are also presented which validate the model.

**Keywords:** *Identification, inverse problem, noise source modelling*

### Resumen

Se presenta un modelo experimental para la identificación de fuentes sonoras. La distribución del tamaño de la fuente se obtuvo mediante la inversión de la función de transferencia, entre la presión acústica radiada y el volumen, empleando la técnica de la transformada pseudo-inversa y aplicando SVD (Single Value Decomposition) como técnica de regularización para prevenir un error excesivo de amplificación. Además, la reconstrucción de la fuente de ruido para cada parte relevante del motor se modela siguiendo la estrategia de aproximación de equivalencia en monopolos. La ventaja del uso de monopolos es que facilita la cuantificación del camino de transmisión. Las funciones de transferencia entre varias partes del motor y los micrófonos son medidas recíprocamente.

Se presentan resultados experimentales para la validación del método.

**Palabras clave:** *Identificación, problema inverso, modelado de fuentes de ruido*

## 1. Introducción

La auralización es el proceso de renderización audible de una fuente de ruido en el espacio, para simular lo que escucharía un receptor en una posición determinada del espacio. La auralización es un aspecto de creciente interés en el ámbito del control de ruido. El proceso de auralización se realiza mediante el modelado de la fuente física siguiendo un proceso de síntesis de ruido. Actualmente existen procedimientos de síntesis de ruido en el dominio del tiempo, aunque trabajando parcialmente en el dominio de la frecuencia podemos obtener numerosas ventajas (Miranda, 2002).

El procedimiento de síntesis comienza con un modelo de la fuente de ruido (fase 1), a continuación se determina experimentalmente o numéricamente las funciones de transferencia entre la fuente y el receptor (fase 2). Con los resultados anteriores se calcula un espectro en frecuencia para una localización determinada del receptor en diferentes instantes de tiempo (fase 3) y se sintetiza la señal de ruido (fase 4). Se considera que el proceso de síntesis ha sido realizado correctamente cuando en la posición del receptor se puede cancelar el ruido de la fuente a partir del ruido sintetizado (fase 5).

Las técnicas de reconstrucción de fuentes de ruido han sido investigadas extensamente en el pasado, y podemos encontrar algunos métodos como el introducido por Billingsley y Kinns (Billingsley y Kinns, 1976), y la técnica generalizada de Nearfield Acoustic Holography (NAH) (Williams, Maynard y Skudrzyk, 1980). Los métodos para el análisis de problemas de control de ruido se basan en el esquema fuente-recorrido de transmisión-receptor. En la mayoría de las situaciones este tipo de análisis es complicado por el hecho de que intervienen multitud de fuentes simultáneamente. Incluso para el caso de una única fuente de ruido como podría ser una máquina, contribuyen multitud de fuentes parciales con distintos recorridos de transmisión. Por lo tanto, el desarrollo del coste-efectividad de las estrategias de reducción de ruido con frecuencia requieren la identificación de las contribuciones de fuentes parciales y caminos de transmisión del sonido radiado en una posición determinada del receptor.

La reconstrucción de las fuentes de ruido es un tema de investigación amplio, aplicado en multitud de áreas. La efectividad de los modelos y las técnicas de identificación de sistemas disponibles han supuesto un importante avance en aplicaciones de diseño de control industrial como por ejemplo la identificación vibro-acústica en el interior de vehículos (Hosseini, Jailani y Kamal, 2009), síntesis de ruido en aviones (Berckmans, Janssens, Van der Auweraer, Sas y Desmet, 2008) o control activo de ruido inducido por un motor en la cabina de un vehículo (Oliveira, Janssens, Gajdatsy, Van der Auweraer, Paolo, Sas y Desmet, 2008). En las últimas décadas, multitud de compañías dedicadas a la fabricación de vehículos han seguido líneas de investigación en esta dirección.

Puede encontrarse una revisión de las principales técnicas empleadas en identificación de fuentes de ruido en Magalhães y Tenenbaum (Magalhães y Tenenbaum, 2004) incluyendo los métodos basados en Fourier (Maynard, Williams y Lee, 1985; Williams, 1999; Jacobsen y Liu, 2005), los métodos BEM (Boundary Element Methods) basados en la ecuación de Helmholtz-Kirchhoff (Veronesi y Maynard, 1989; Kim y Lee, 1990;

Bai, 1992) y los métodos de fuentes equivalentes (Isakov y Wu, 2002; Wang y Wu, 1997; Wu y Yu, 1998; Rayess y Wu, 2000; Ochmann, 1999; Ochmann, 2004).

Este trabajo se centra en la obtención de un modelo de identificación de fuentes sonoras mediante técnicas AES (Acoustic Equivalent Source) y está basado en el estudio teórico preliminar de Berckmans ( Berckmans, Pluymers, Sas and Desmet, 2008).

## 2. Modelo teórico de Identificación

Se ha seguido un método denominado “Inversión de indicadores de presión” para la reconstrucción de la distribución de la fuente de ruido en un prototipo de simulación de ruido de un motor construido para tal experiencia. Las medidas de presión se obtienen a partir de una matriz de micrófonos que se representa mediante un vector complejo P de tamaño Mx1 que es dependiente de la frecuencia. Las funciones de transferencia acústica

$H_{ij} \left[ \frac{\text{Pa}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$  de la matriz H representan la relación entre los descriptores de la fuente y el receptor y pueden obtenerse mediante medidas o bien ser calculados numéricamente

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{P_1 Q_1} & H_{P_1 Q_2} & \dots & H_{P_1 Q_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{P_M Q_1} & H_{P_M Q_2} & \dots & H_{P_M Q_N} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_N \end{pmatrix} \quad (1)$$

donde P [Pa] es la presión, M son los indicadores de medidas de presión, Q es un vector que contiene la velocidad de volumen y N es el número de velocidades de volumen desconocidas.

Desde un punto de vista acústico los altavoces pueden ser sustituidos por un número suficiente de monopolos. La técnica SMT (Power-based substitution monopole) fué publicada por Verheij en 1992 (Verheij, 1992) y posteriormente se desarrolló en el proyecto Brite Euram PIANO (Verheij, Hoebrechts and Thompson, 1994; Verheij, Hopmans, Liebrechts, 1996). Se puede considerar la aproximación mediante monopolos cuando el diámetro de la fuente es mucho más pequeño que la longitud de onda del sonido emitido. El sonido es omnidireccional si la longitud de onda es mayor que la frecuencia de salida. Como regla general para crear la omnidireccionalidad, la longitud de onda tiene que ser seis veces mayor que el diámetro. En este sentido, cada elemento de la matriz de transferencia H se calcula mediante la siguiente expresión

$$H = j\rho\omega \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (2)$$

siendo r [m] la distancia entre el receptor y la fuente, k [rad/m] el número de ondas,  $\omega$  [rad/s] la pulsación y  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] la densidad de fluido.

Generalmente se asume que el número de fuentes  $N$  es menor o igual al número de micrófonos  $M$ , tal y como se establece en las referencias (Dumbacher y Brown, 1996; Kim y Nelson, 2004; Nelson y Yoon, 2000; Schuhmacher y Hansen, 2001; Holland y Nelson, 2003). La determinación de  $Q$  a partir de  $P$  en este modelo está basada en la inversión de la matriz  $H$  y por lo tanto la dificultad está en dicha inversión que a menudo se considera como un problema mal condicionado (ill-conditioned). En esta investigación se mostrarán varios casos en estudio donde el sistema está sobredimensionado, i.e.  $M \gg N$ , o bien es cuadrado,  $M=N$ . En el primer caso, la matriz inversa necesita ser definida mediante la aplicación de la llamada matriz pseudo-inversa.

El número de condición de la matriz de transferencia expresa la sensibilidad del problema de inversión en los errores de medida. Las matrices mal condicionadas, con números de condición elevados, podrían provocar un gran error de amplificación en el vector de velocidad de volumen predicho. Estos errores podrían evitarse con el empleo de técnicas de regularización, aunque el inconveniente de estas técnicas es que reducen la exactitud de la matriz inversa, resultando por lo tanto una resolución espacial mucho peor en las velocidades de volumen. El método más usual para calcular la pseudo-inversa es la Descomposición del Valor Singular (SVD). La matriz  $H$  se puede describir mediante  $H=USV^+$  en la cual  $U$  y  $V$  son matrices de transformación que satisfacen  $U^+U=I$  y  $V^+V=I$  siendo  $I$  la matriz identidad y  $+$  la transpuesta conjugada (matriz Hermitian). La pseudo-inversa tiene la siguiente expresión

$$H_{(M \times N)}^{-1} = U_{(M \times N)} S_{(N \times N)}^{-1} V_{(N \times N)}^+ \quad (3)$$

siendo  $S$  la diagonal de la matriz de valores singulares  $S = \text{diag}(S_1^{-1}, \dots, S_r^{-1}, 0, \dots, 0)$ ,  $V$  la matriz unidad y  $U$  la matriz truncada.

Algunas técnicas de regularización como Tikhonov o TSVD (Truncated Singular Value Decomposition) son con frecuencia indispensables para suprimir las componentes inestables. El problema del mal condicionamiento de la matriz de función de transferencia es discutido por diferentes autores (Jacobsen and Liu, 2005; Nelson and Yoon, 2000). En nuestro caso para simplificar el estudio la regularización fue omitida aunque se considerará como una línea de mejoras a implementar en el modelo de identificación.

### 3. Caso en estudio: prototipo del ruido de un motor

El principal objetivo de este artículo es la identificación de fuentes sonoras en un motor empleando un prototipo diseñado para esta investigación mediante un modelo basado en indicadores de medidas de presión. El prototipo se compone de una caja rectangular con las siguientes dimensiones 902 mm por 602 mm por 190 mm con 24 monopolos separados una distancia de 150 mm. Enfrente de éste se situó un array de sensores consistente en una estructura de aluminio con 24 agujeros para fijar los micrófonos, ver Fig. 1.

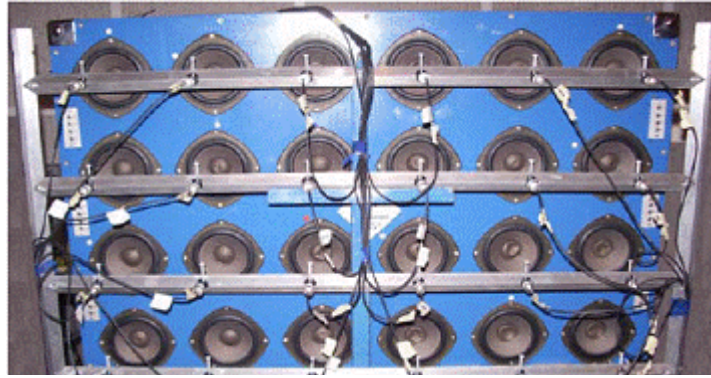


Figura 1: Prototipo con 24 monopolos y matriz de 24 micrófonos.

Para la realización de las medidas se empleó un medidor multicanal denominado LMS SCADA y como sensores se utilizaron micrófonos prepolarizados de Brüel and Kjaer  $\frac{1}{2}$ " , para realizar las medidas en campo cercano y de  $\frac{1}{4}$ " , para realizar las medidas en campo lejano, del tipo 4189. El registro de los datos se llevó a cabo con el software LMS Test.Lab y para la realización del modelo y la correspondiente identificación se desarrolló e implementó un programa en Matlab/Simulink. Todas las medidas se realizaron en una cámara semianecoica tal y como se muestra en la Fig. 2.

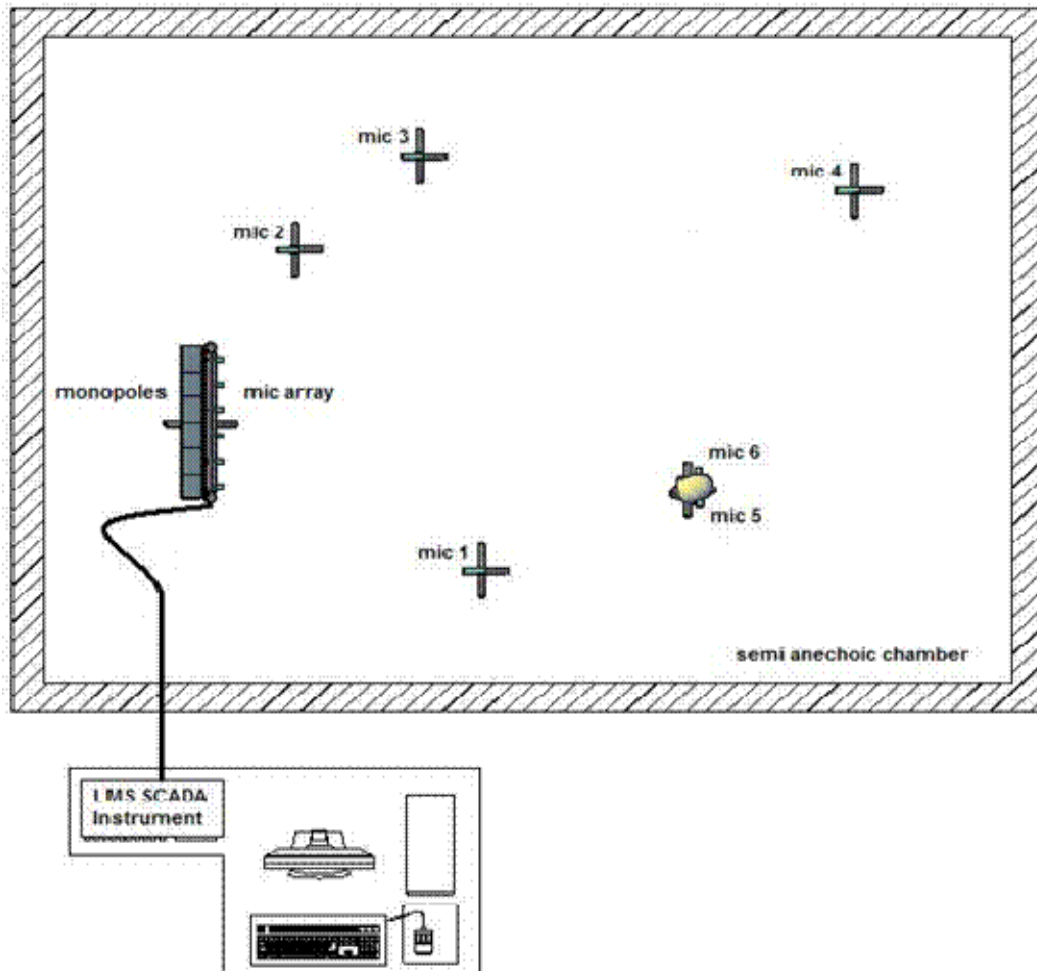


Figura 1: Configuración del esquema de medida.

La frecuencia de resolución empleada fue 1.5625 Hz y el número de medias espectrales realizadas para el análisis fue 100.

Para las medidas en campo lejano se emplearon 6 micrófonos situados en distintas posiciones, 1 m, 1.5 m, 2 m, 3 m y 3.5 m a distintos ángulos con respecto a los monopolos, los micrófonos 1 y 2 a  $45\pm 10^\circ$ , y el micrófono 3 a  $20\pm 10^\circ$ , a una altura de 1.65 m con respecto al suelo.

Se realizaron tres medidas distintas:

- Presión operacional en campo cercano.
- FRF (Frequency Response Function) en campo cercano.
- FRF (Frequency Response Function) en campo lejano.

#### 4. Resultados

Una vez descrito el modelo de presión empleado para la identificación del sistema, a continuación se muestran los casos en estudio llevados a cabo. Para las distribuciones de fase mostradas en la Fig. 3, empleando una señal de ruido cuadrada a 400 Hz se han investigado dos configuraciones distintas: 24 micrófonos y 24 monopolos ( $M=N$ ) y 24 micrófonos y 12 monopolos ( $M\gg N$ ).

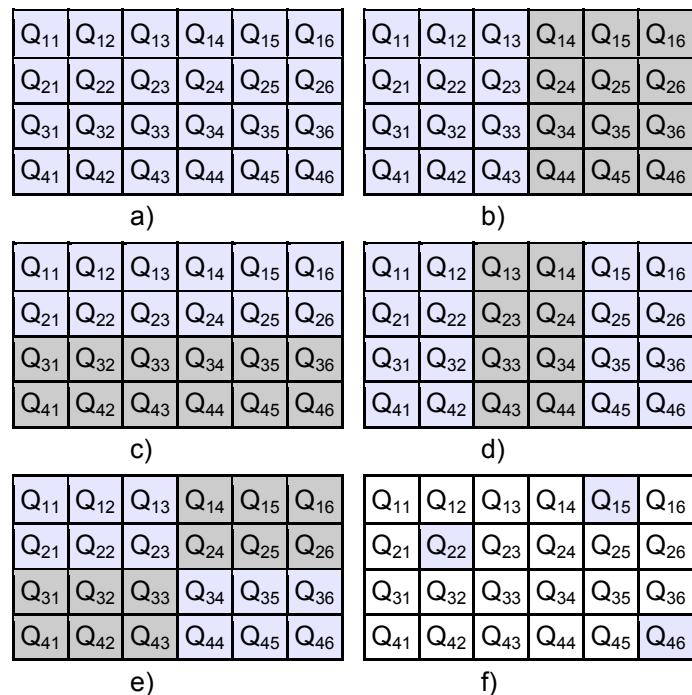


Figura 3: Configuración de los casos en estudio: a) todos los monopolos con fase positiva; b) 12 monopolos con fase positiva y 12 monopolos con fase negativa; c) igual que el caso b) pero la distribución de los monopolos es en horizontal; d) 16 monopolos con fase positiva y 8 con fase negativa; e) 12 monopolos con fase positiva y 12 monopolos con fase negativa; f) 3 monopolos activos con fase positiva y el resto no activos.

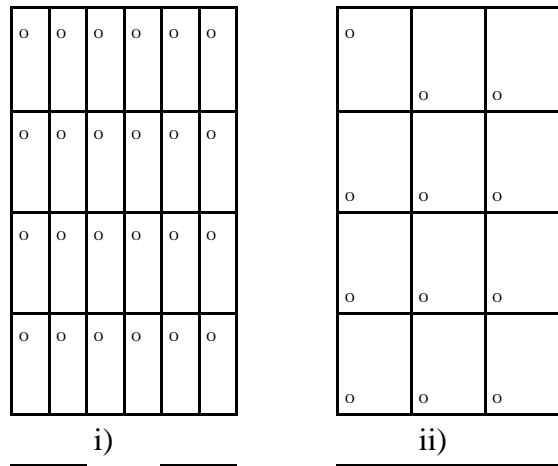


Figura 4: Configuración del número de monopolos: i) 24 monopolos; ii) 12 monopolos.

Para cada caso en estudio descrito en la Fig. 3 se han obtenido un total de seis resultados de identificación correspondientes a seis posiciones distintas del observador en campo lejano, ver Fig. 2. Las funciones de transferencia, como ya se ha explicado anteriormente, fueron medidas recíprocamente. Esto supuso un total de 72 funciones de transferencia medidas sólo en campo lejano, más 24 de campo cercano, por este motivo solo se comentarán los resultados más relevantes de cada caso en estudio.

La Fig. 5 muestra el número de condición de la función de transferencia en campo cercano. La matriz H presenta el problema del mal condicionamiento a altas frecuencias, recuadro verde en Fig. 5, resultando por lo tanto un error de amplificación mayor. Por lo tanto, solo se han tenido en cuenta los resultados obtenidos en el rango de frecuencias de 0 a 2000 Hz. Dentro de este rango solo se consideran aquellas frecuencias múltiplo de 400 Hz, ya que la señal de ruido emitido es una onda cuadrada de frecuencia 400 Hz, por lo que la identificación solo es significativa para estas frecuencias.

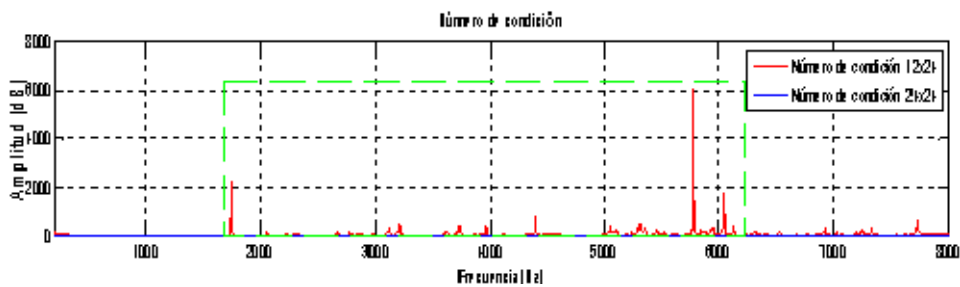


Figura 2: Número de condición de la función de transferencia en campo cercano.

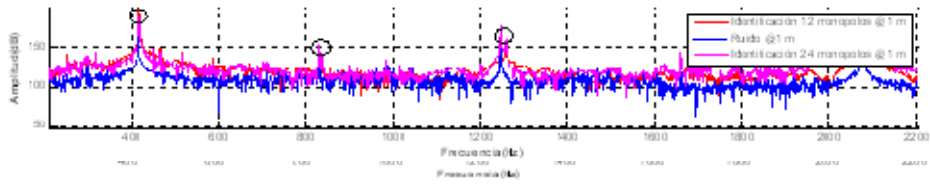


Figura 3: Resultados de la identificación para el caso a).

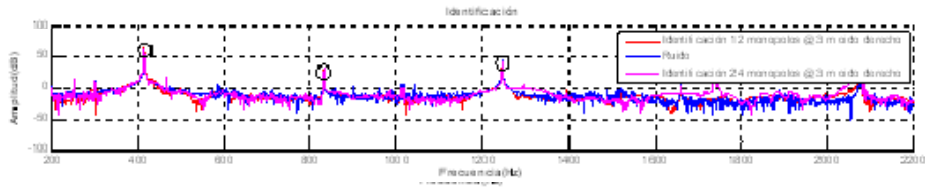


Figura 4: Resultados de la identificación para el caso b).

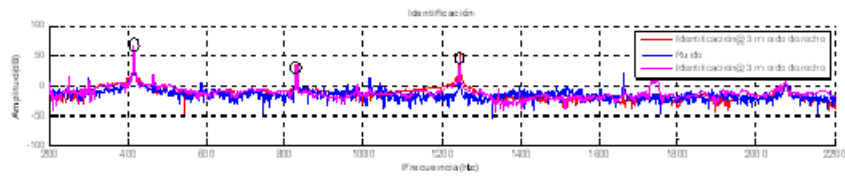


Figura 5: Resultados de la identificación para el caso c).

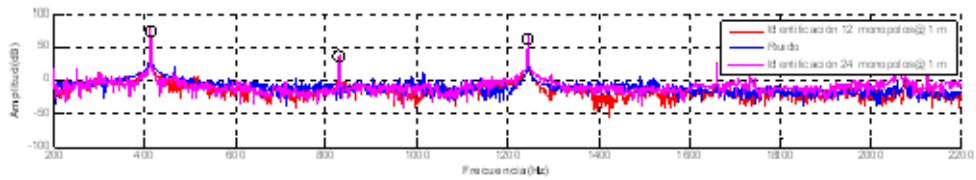


Figura 6: Resultados de la identificación para el caso d).

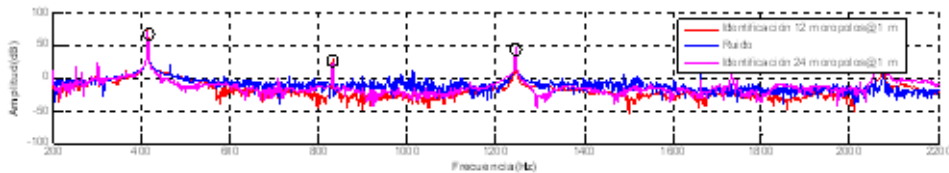


Figura 7: Resultados de la identificación para el caso e).



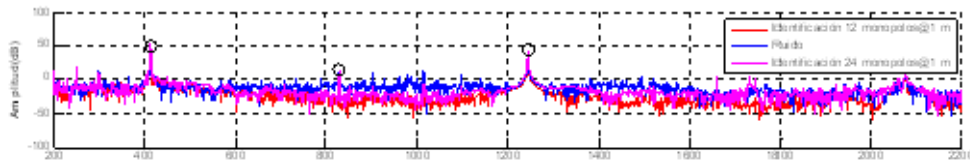


Figura 8: Resultados de la identificación para el caso f).

## 5. Conclusiones

Para todos los problemas tratados en esta investigación, la función de transferencia  $H$  presenta un buen condicionamiento a frecuencias inferiores a 2000 Hz. Una futura línea de investigación sería estudiar las mejoras que las técnicas de regularización podrían aportar en el algoritmo de identificación.

Como se pueden ver en las figuras, se han conseguido resultados favorables de identificación incluso cuando la cantidad de indicadores de presión es igual al número de monopolos y es independiente de la posición en la que se encuentre el observador. Para validar completamente el modelo, serían necesarios realizar un estudio más ambicioso con otra gama de ruidos y variando el número de monopolos y el de indicadores de presión, así como comprobar el error cometido en el sistema de identificación.

## Referencias

- Bai, M.R. (1992). Application of bem (boundary element method)-based acoustic holography to radiation analysis of sound sources with arbitrarily shaped geometries. *Journal of the Acoustical Society of America*, 92 (1), 533-549.
- Berckmans, D., Janssens, K., Van der Auweraer, H., Sas, P., and Desmet, W. (2008). Model-based synthesis of aircraft noise to quantify human perception of sound quality and annoyance. *Journal of Sound and Vibration*, 311 (3-5), 1175-1195.
- Billingsley, J., Kinns, R. (1976). The acoustic telescope, *Journal of Sound and Vibration* 48 (4).
- DeLillo, T., Isakov, V., Valdivia, N., and Wang, L.J. (2003). The detection of surface vibrations from interior acoustical pressure. *Inverse Problems*, 19(3), 507-524.
- Dumbacher, S.M., and Brown, D.L. (1996). Source imaging of irregularly shaped surfaces using inverse FRF method, *Proceeding of ISMA21, Leuven*.
- Holland, K.R., and Nelson, P.A. (2003). Sound source characterisation: the focussed beamformer vs the inverse method, *Proceeding of ICSV 10, Sweden*.
- Isakov, V., and Wu, S.F. (2002). On theory and application of the helmholtz equation least squares method in inverse acoustic. *Inverse Problems*, 18(4), 1147-1159.
- Jacobsen, F., and Liu, Y. (2005). Nearfield acoustic holography with particle velocity transducers. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118 (5), 3139-3144.

- Kim, Y., and Nelson, P.A. (2004). Optimal regularisation for acoustic source reconstruction by inverse methods, *Journal of Sound and Vibration*, 275.
- Kim, G.T., and Lee, B.H. (1990). 3-D sound source reconstruction and field reprediction using the helmholtz integral-equation. *Journal of Sound and Vibration*, 136 (2), 245-261.
- Louis, A.K. (1999). A unified approach to regularization methods for linear ill-posed problems. *Inverse Problems*, 15(2), 489-498.
- Magalhães, M.B.S., and Tenenbaum, R.A. (2004). Sound sources reconstruction techniques: A review of their evolution and new trends. *Acta Acustica United with Acustica*, 90 (2), 199-220.
- Maynard, J.D., Williams, E.G., and Lee, Y. (1985). Nearfield acoustic holography. 1.theory of generalized holography and the development of NAH. *Journal of the Acoustical Society of America*, 78 (4), 1395-1413.
- Nelson, P.A., and Yoon, P.C. (2000). Estimation of acoustic soure strength by inverse methods: part 1, conditioning of the problem, *Journal of Sound and Vibration* 233(4), 643-668.
- Ochmann, M. (2004). The complex equivalent source method for sound propagation over an impedance plane. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(6), 3304-3311.
- Ochmann, M. (1999). The full-field equations for acoustic radiation and scattering. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105(5), 2574-2584.
- Oliveira, L.P.R., Janssens, K., Gajdatsy, P., Van der Auweraer, H., Paolo, S.V., Sas, P., and Desmet, W. (2008). Active sound quality control of engine induced cavity noise. *Mechanical Systems and Signal Processing*, doi:10.1016/j.ymssp.2008.04.005.
- Rayess, N., and Wu, S.F. (2000). Experimental validations of the hels method for reconstructing acoustic radiation from a complex vibrating structure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 107(6), 2955-2964.
- Schumacher, A.P., and Hansen, P.C. (2001). Sound source reconstruction using inverse bem, *Proceeding of Inter-Noise 2001*, Holland.
- Verheij, J.W., Hopmans, L.J.M., and Liebrechts, R.M.J. (1996). Use of a new source descriptor for designing quieter heavy road vehicles, *Proceedings of ISMA21, International Conference on noise and Vibration Engineering*, Leuven.
- Verheij, J.W., Hoebrechts, A.N.J., and Thompson, D.J. (1994). Acoustical source strength characterisation for heavy road vehicle engines in connection with pass-by noise. *Third International Congress on air-and structure-borne sound and vibration*, Montreal.
- Verheij, J.W. (1992). Reciprocity method for quantification of airborne sound transfer form machinery. *Second International Congress on air- and structure-borne sound and vibration*, USA.

Veronesi, W.A., and Maynard, J.D. (1989). Digital holography reconstruction of sources with arbitrarily shaped surfaces. *Journal of Acoustical Society of America*, 85 (2), 588-598.

Visser, R. (2004). A boundary element approach to acoustic radiation and source identification. Phd thesis.

Wang, Z.X., and Wu, S.F. (1997). Helmholtz equation least-squares method for reconstructing the acoustic pressure field. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4), 2020-2032.

Williams, E.G. (1999). *Fourier Acoustics: Sound radiation and Nearfield Acoustical Holography*. Academic Press.

Williams, E.G., Maynard, J.D., Skudrzyk, E. (1980). Sound source reconstructions using a microphone array, *Journal of Acoustical Society of America* 68 (4), 340-344.

Wu, S.F. And Yu, J.Y. (1998). Reconstructing interior acoustic pressure fields via helmholtz equation least-squares method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 104(4), 2054-2060.

#### Agradecimientos

Este estudio fue realizado y financiado por el grupo de investigación de ruido y vibraciones de la Katholieke Universiteit de Leuven durante una estancia de la autora bajo la dirección del profesor Paul Sas y la supervisión de su colaborador Dries Berckmans.

Correspondencia (Para más información contacte con):

M<sup>a</sup>Dolores Redel-Macías

Área de Proyectos de Ingeniería. Universidad de Córdoba.

Campus Universitario de Rabanales. Edificio Leonardo Da Vinci

Carretera de Madrid km. 396 14071 Córdoba (Spain)

Phone: +34 957 21 22 22

E-mail: [mdredel@uco.es](mailto:mdredel@uco.es)