

Modelo de identificación de fuentes sonoras. Aplicación al ruido del motor de un automóvil

M. D. Redel-Macías*, D. Berckmans**, A.J. Cubero-Atienza*

*Universidad de Córdoba, Escuela Politécnica Superior, Campus de Rabanales,
Edificio Leonardo da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071, Córdoba, España (e-
mail: mdredel, ir1cuata@uco.es)

**Dt. Mechanical Engineering Katholieke Universiteit Leuven, Celestijnenlaan
300B, B-3001 Leuven, Belgium (e-mail: Dries.Berckmans@mech.kuleuven.be)

Resumen: La Directiva 49/2002/CE de la UE obliga a los fabricantes de vehículos a certificar las emisiones de ruido al exterior, estableciendo importantes restricciones al respecto. Por lo tanto, resulta imperativo establecer modelos que identifiquen las fuentes de ruido en un vehículo, así como la exactitud de los mismos. En este artículo se presenta un modelo de identificación de fuentes sonoras para el estudio y caracterización del ruido del motor en vehículos. El ruido es experimentalmente caracterizado mediante la técnica de sustitución de monopolos adaptado al método general de síntesis de sonido. La técnica de identificación resultante se ilustra mediante varios casos en estudio variando el número de monopolos y la posición del receptor, determinando la precisión del sistema en cada caso. Los resultados indican que el error cometido en el caso más desfavorable es inferior a 15 dB. Copyright © 2010 CEA.

Palabras Clave: Síntesis de sonido, Identificación, "loudness", Calidad del Sonido, ASQ.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido y las vibraciones en los vehículos son temas de creciente interés para los fabricantes de automóviles, motivado principalmente por la aparición de regulaciones que limitan las emisiones de ruido exterior. Para ello, actualmente someten a los vehículos fabricados a una serie de test recogidos en los estándares internacionales, denominados Pass-by y Coast by Noise. Por otro lado, las empresas, en el establecimiento de la calidad de los productos persiguen cada vez más una calidad óptima del sonido de los mismos. En el sector de la automoción, la calidad del sonido exterior e interior de los vehículos se ha convertido en toda una estrategia de marketing para atraer a los consumidores. Tradicionalmente los ingenieros en acústica han empleado métodos de medida y evaluación del sonido como el análisis basado en la transformada rápida de Fourier (FFT análisis) o el nivel equivalente de presión sonora ponderado A, aunque este tipo de parámetros resultan insuficientes para establecer la calidad del sonido percibido. Hoy día la decisión final sobre la calidad del sonido de un vehículo es tomada por un grupo de personas en los llamados "Jury Testing" o Jurados de Pruebas. La idea es que un grupo de personas evalúan la calidad del sonido de los distintos componentes del automóvil, por ejemplo, el motor, las ruedas, las puertas, entre otros. El establecimiento de la calidad del sonido depende, por lo tanto, de la subjetividad del observador y en ocasiones, resulta imposible eliminar este tipo de influencias, por lo que se convierte en un proceso muy complicado de llevar a cabo y poco contrastable. Por estas razones, resulta fundamental desarrollar modelos de fuentes sonoras que nos permitan identificar con

cierta fiabilidad y de manera sencilla la experiencia de un observador en una determinada posición receptora y establecer métricas específicas que cuantifiquen la calidad del sonido percibido.

Con frecuencia, la complejidad de este tipo de sistemas requiere de la identificación de modelos de manera tal que la diferencia de comportamiento entre el sistema real y su representación matemática sea mínima (Haro, 2008) (García-Nieto, 2009). En general, podemos decir que cualquier proceso de identificación consiste en obtener una representación del sistema a partir de los datos disponibles del mismo (Biagiola y Figueroa, 2009). En acústica a través de los métodos de Síntesis de Sonido dirigidos a la auralización del sonido producido por una fuente física de ruido podemos conocer cómo escucharía esta fuente de ruido un observador en una posición arbitraria. Para adaptar la aproximación de síntesis, la fuente física de ruido es representada por un modelo equivalente de fuente mediante el cual obtenemos un comportamiento similar de la misma en campo lejano.

Las principales fuentes de ruido en un vehículo, en condiciones normales de funcionamiento, pueden considerarse el ruido del motor y el de rodadura, pero también pueden contribuir el ruido del tubo de escape o el ruido aerodinámico. La experiencia de un observador en una determinada localización puede establecerse, se ha comentado anteriormente, mediante modelos de síntesis de sonido. La predicción del espectro en frecuencia en una posición receptor es el primer paso en un modelo de este tipo. Esta parte del proceso incluye el modelado de las contribuciones de las

distintas fuentes de ruido y la determinación de los caminos de transferencia (“*Transfer path Tps*”) siguiendo un modelo *fente-transmisión-receptor*. El paso siguiente es la síntesis de la señal de sonido en el tiempo.

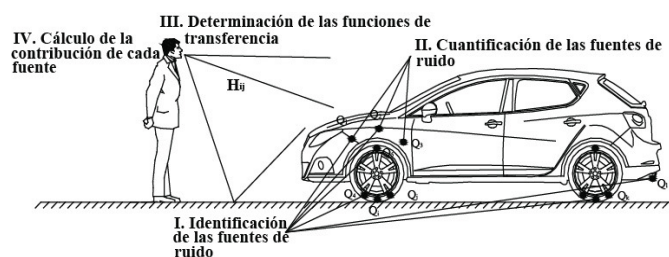


Figura 1. Primera etapa en modelos de Síntesis de Sonido.

En Síntesis de Sonido el proceso de identificación del sistema se corresponde con una serie de etapas:

- I) La primera parte del proceso empieza con una identificación de las diferentes contribuciones de las fuentes de ruido, tales como, el motor, ruedas, tubo de escape, entre otras.
- II) El segundo paso, a menudo es el más complicado, consiste en cuantificar la contribución de las fuentes de ruido identificadas en el paso anterior.
- III) En el tercer paso se determinan las funciones de transferencia entre la fuente de ruido y el receptor de dos formas posibles, numéricamente o experimentalmente.
- IV) Finalmente, el espectro del sonido en la posición receptora se calcula a través de los resultados obtenidos en los pasos anteriores.

Las técnicas de Identificación de Fuentes de Ruido han estado en constante desarrollo en las últimas décadas. Podemos distinguir principalmente tres métodos: “*Sound Intensity*” (Crocker, 1983), “*Acoustic Holography*” (NAH) (Williams, 1980) y “*Airborne Source Quantification*” (ASQ) (Verheij, 1997).

El principio básico de la técnica de “*Sound Intensity*” es la medida de la energía acústica que pasa por unidad de área. Mediante la integración de la superficie próxima al objeto en estudio se calcula la potencia del sonido. La principal ventaja es que permite determinar la direccionalidad del sonido pero tiene el inconveniente de su alta sensibilidad a los efectos del viento, lo cual restringe la distancia del receptor ya que las medidas deben llevarse a cabo muy próximas a la superficie de la fuente de ruido.

Las técnicas NAH están basadas en un tratamiento numérico de las presiones acústicas registradas por micrófonos, permitiendo una retropropagación de la onda desde la superficie de medida hasta la superficie de la fuente de ruido. Entre las ventajas de esta técnica están una alta resolución a baja frecuencia y el establecimiento del tamaño de la fuente. Los principales inconvenientes son el gran tiempo de computación necesario, y la sensibilidad inherente a los problemas de identificación necesitando en la mayoría de los casos técnicas de regularización en el paso de inversión.

El método ASQ representa la fuente física de ruido con un número limitado de descriptores distribuidos en la superficie de la misma. Además de tener una alta eficiencia computacional,

los modelos ASQ permiten calcular fácilmente las funciones de transferencia y cuantifica las fuentes acústicas.

El objetivo principal de este artículo es la obtención de modelos de identificación de fuentes sonoras que nos permitan conocer la experiencia de un observador en una determinada posición receptora, cuantificando la calidad del sonido percibido, para aplicarlo a los test realizados en los vehículos en la determinación del ruido emitido por el motor de los mismos. La idea fundamental es buscar modelos de fuentes sonoras muy simples que consten de pocos descriptores y que sean capaces de aportar la precisión perseguida en los procesos de síntesis de sonido. La ventaja de los modelos ASQ comparada con otras técnicas como NAH es el bajo coste computacional. Por este motivo se empleará este método en el proceso de identificación del presente sistema.

2. MODELO MATEMÁTICO

El Análisis de Caminos de Transferencia (“*Transfer Path Analysis TPA*”) es un procedimiento mediante el cual se puede determinar el flujo de energía vibro-acústica desde la fuente, a través de estructuras sólidas y el aire, hasta una posición receptora determinada. Cuando solamente interviene como medio de transmisión el aire, como es el caso del ruido del motor de un vehículo, el TPA se denomina ASQ.

Podemos encontrar dos problemas en la construcción de modelos ASQ: el tipo de elemento descriptor de la fuente y la cuantificación de los diferentes elementos descriptores del modelo.

En función del tipo de descriptor empleado los modelos se pueden clasificar en:

- Modelos basados en patrones de velocidad de la estructura (Verheij, 1997).
- Modelos basados en medidas de la velocidad de las partículas de aire (Berckmans, 2008).
- Modelos basados en medidas de presión (Mantoani y Bertolini, 1996; Van der linden et al., 1996).

El modelo de identificación que se presenta en esta investigación está basado en descriptores de presión acústica obtenidos a partir de las medidas realizadas con micrófonos convencionales. La presión acústica en cualquier posición receptor j puede expresarse como una suma de las presiones parciales P_{ij} , i.e, la presión en una localización j causada por la vibración de la superficie i del motor. Los descriptores usados en este modelo son cuantificados según un método inverso denominado “*Pressure Indicator Inversion*”. Las presiones medidas se obtienen a partir de una matriz de micrófonos (Fig. 2) y se representan mediante un vector complejo P . Las funciones de transferencia acústicas H_{ij} [$\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$] de la matriz H entre el receptor y la fuente pueden obtenerse directamente o recíprocamente. El cálculo directo es con frecuencia inestable y requiere un gran coste computacional, por lo que se emplea la reciprocidad: se sitúa una fuente de ruido omnidireccional en la posición del receptor y los micrófonos en la posición de la fuente midiendo las presiones acústicas para cada posición receptora a identificar.

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

P [Pa] es la presión acústica, como se ha mencionado anteriormente, M es el número de presiones medidas en la posición receptora, Q [m^3s^{-1}] velocidad del volumen es un vector que contiene la fuente acústica a identificar y N es el número desconocido de fuentes a determinar. Generalmente se asume que el número N de fuentes tiene que ser menor o igual al número M de presiones en la posición receptor, tal y como aparece en (Dumbacher y Brown, 1996; Kim y Nelson, 2004; Nelson y Yoon, 2000; Schuhmacher y Hansen, 2001; Holland y Nelson, 2003). El establecimiento de Q a partir de P en este modelo se basa en la inversión de la matriz H . La dificultad aparece precisamente en la inversión de dicha matriz ya que con frecuencia presenta el problema de un mal condicionamiento. En la práctica, el sistema se sobredetermina para mejorar el condicionamiento. En este trabajo se analizan varios casos en estudio de la matriz H para $M \gg N$ o cuadrada $M=N$. En el primero de los casos, para el cálculo de la matriz inversa es necesario redefinirla aplicando la denominada Pseudoinversa. La obtención de la pseudoinversa se ha llevado a cabo siguiendo el método comúnmente denominado “*Singular Value Decomposition*” (SVD). Según este método la matriz H puede escribirse como

$$H_{(m \times n)} = U_{(m \times n)} S_{(n \times n)} V_{(n \times n)}^+ \quad (2)$$

donde U y V son matrices transformación que satisfacen $U^+U=I$ y $V^+V=I$, I es la matriz identidad, $+$ denota la matriz transpuesta Hermitian y S es una matriz diagonal de valores singulares $S = \text{diag}(s_1^{-1}, \dots, s_r^{-1}, 0, \dots, 0)$.

La inversión de la matriz H mediante (2) se obtiene fácilmente debido a que los valores singulares se sobre-amplifican en el proceso de inversión. A menudo también suelen emplearse técnicas de regularización como “Tikhonov” o “*Truncated Singular Value Decomposition*” (TSVD) para suprimir las componentes inestables (Louis, 1999; Visser, 2004; DeLillo et al., 2003; Jacobsen y Liu, 2005; Nelson y Yoon, 2000). En las secciones siguientes se estudiará el condicionamiento de la función de transferencia H en nuestro sistema.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El principal objetivo de este artículo es identificar fuentes de ruido generadas por el motor de un vehículo mediante un modelo sencillo basado en descriptores de presión acústica. El ruido del motor del vehículo es experimentalmente caracterizado por un prototipo mediante la técnica de sustitución por monopolos: se subdivide la superficie de la fuente en áreas que abarcan partes operativas y no operativas denominadas monopolos. Todos los monopolos tienen una distribución en velocidad de volumen conocida y relaciones de fase mutuas derivadas de las medidas de presión obtenidas en las proximidades de la fuente las cuales son derivadas del método ASQ. Cuando el tamaño de las divisiones es muy grande, debido a que se considere un número menor de monopolos en el modelo, es necesario también realizar la media entre las

funciones de transferencia de las divisiones (Fig. 3). La técnica de sustitución por monopolos (Power-based Substitution monopole SMT) fue publicada por Verheij en 1992 (Verheij, 1992) y posteriormente desarrollada en el proyecto Brite Euram PIANO (Verheij et al, 1994) (Verheij, 1996). La presión acústica producida por un monopolo a una distancia r viene dada por la siguiente expresión

$$p(r) = i \rho c k \frac{Q}{4 \pi r} e^{-ikr} \quad (3)$$

donde ρ [kgm^{-3}] es la densidad del aire, c [ms^{-1}] es la velocidad del sonido en el aire, ω [rads^{-1}] es la frecuencia, k [m^{-1}] es el número de onda, r [m] es la distancia medida desde el centro de la fuente de ruido y Q [m^3s^{-1}] es la fuente acústica.

En este sentido, cada elemento de la función de transferencia H según (1) puede representarse usando la formulación de monopolos descrita en (3) como

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

El prototipo desarrollado para esta investigación consta de una caja rectangular de 902x602x190 mm con 24 altavoces separados por una distancia de 150 mm. En frente de ésta, a una distancia de 100 mm, se encuentra situada la matriz de micrófonos (Fig. 2).



Figura 2. Caja de altavoces y matriz de micrófonos.

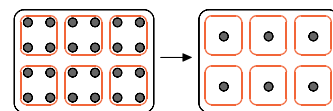


Figura 3. Media de funciones de transferencia en los monopolos.

Para el registro de medidas se ha utilizado un medidor multicanal denominado SCADAS de LMS, micrófonos prepolarizados de Brüel and Kjaer (B&K) de media pulgada y de un cuarto de pulgada. La configuración de la cadena de medida se lleva a cabo con el software LMS Test.Lab. Los datos registrados son procesados para la realización de la identificación con Matlab. Todas las medidas se realizan en el interior de una cámara semianecoica tal y como puede apreciarse en la Fig. 4. Las medidas se llevan a cabo con una frecuencia de muestreo de 2.56 kHz sobre una frecuencia de span de 12.8 kHz. La frecuencia de resolución empleada en el análisis es de 1.5625 Hz con 100 medias espectrales. Se ha empleado una media lineal para poner el mismo énfasis en todos los espectros o registros de tiempo.

Se establecen seis posiciones de receptor a distintas distancias

de la fuente de ruido para la identificación (Fig.4). Una vez realizada la identificación en cada posición se compara con los registros reales recogidos por los micrófonos situados en dichas posiciones en el prototipo. Todos los micrófonos en la posición receptor están situados a una altura de 1.65 m con respecto al suelo en la dirección de la fuente a distintos ángulos, los micrófonos 1 y 2 a $45 \pm 10^\circ$, el micrófono 3 a $20 \pm 10^\circ$ y los micrófonos 5 y 6 están situados en una posición binaural, correspondiente a los oídos de una persona (Fig.4).

Se ha empleado un ruido Random burst entre 100-8000 Hz de frecuencia para simular el ruido del motor. Mediante un amplificador se modifica únicamente la fase del ruido emitido por los distintos altavoces del panel de pruebas. Las configuraciones de fase estudiadas para cada altavoz (Q_{ij}) son las mostradas en la figura 5.

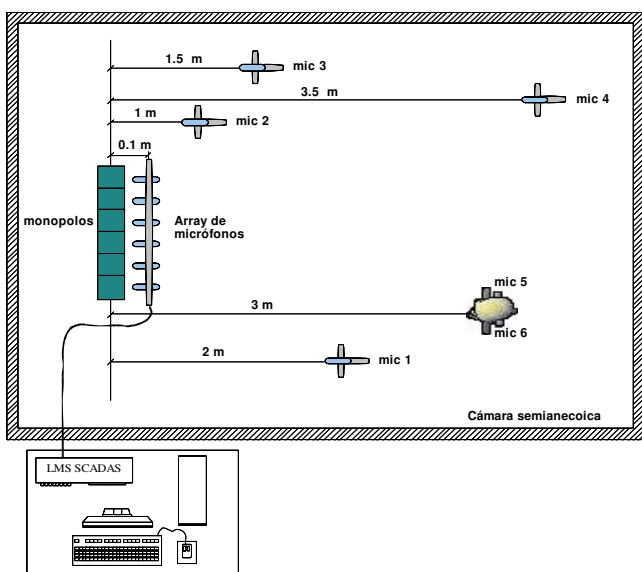


Figura 4. Distribución en planta del experimento.

Figura 5. Distribución de fases de los casos en estudio.

Las medidas realizadas constan de cuatro adquisiciones diferentes:

- Presiones a 10 cm de la fuente de ruido, para el cálculo de Q según (1).
- Presiones a 1 m, 1.5 m, 2 m, 3.5 m y en posición binaural a 3 m, para comparar los resultados de nuestra identificación con los registros reales.

- Presiones en campo lejano para el cálculo de la función de transferencia en campo lejano aplicando en principio de reciprocidad.
- Presiones en campo cercano para el cálculos de la función de transferencia en campo cercano aplicando el principio de reciprocidad.

Para el cálculo de la función de transferencia en campo cercano aplicando el principio de reciprocidad son necesarios 576 registros de presiones acústicas correspondientes a situar la fuente omnidireccional de ruido en cada posición de la matriz de micrófonos. A partir de estos datos se determina la función de transferencia en campo cercano obteniéndose una matriz de 24×24 para cada frecuencia en estudio, es decir de $24 \times 24 \times 8193$. La función de transferencia en campo lejano se obtiene de la misma manera resultando finalmente una matriz de $6 \times 24 \times 8193$.

El algoritmo de identificación seguido puede descomponerse según el diagrama de la figura 6 en:

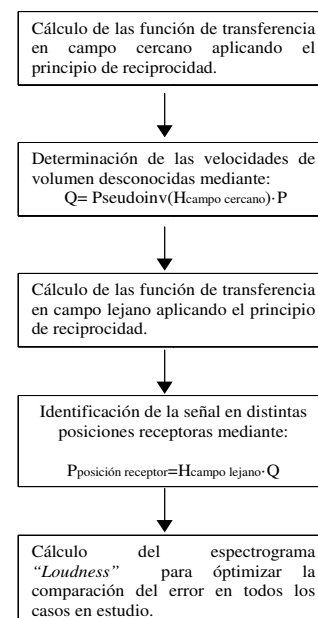


Figura 6. Esquema del algoritmo de identificación.

La principal limitación encontrada en otras técnicas de identificación de fuentes acústicas, como por ejemplo la "Acoustic Holography", es el gran número de micrófonos necesarios, lo cual se traduce en un mayor coste y en una disminución de la eficiencia computacional del algoritmo ya que se trabaja con un gran volumen de datos. Mediante los modelos de síntesis de sonido, buscamos estudiar cual es el número mínimo de descriptores necesarios para conseguir un error aceptable en la identificación aceptable reduciendo el coste computacional. El número y la distribución de los descriptores se ha llevado a cabo siguiendo la técnica de sustitución por monopolos, explicada anteriormente, calculando la media de las funciones de transferencia para los casos en estudio que se recogen en la figura 7. En la Tabla 1 se muestra un resumen de todas las configuraciones investigadas, la segunda columna hace referencia a las configuraciones de fase indicadas en la Fig. 5 y la tercera columna hace referencia a las configuraciones de monopolos descritas en la Fig. 7.

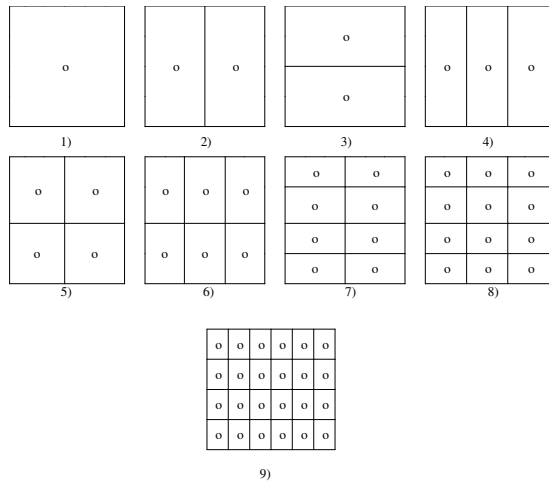


Figura 7. Configuración de monopolos.

Tabla 1. Resumen de casos en estudio

Ref. Modelo	Conf. Fase	Conf. Monopolos
V1.1	a	1-9
V1.2	b	1-9
V1.3	c	1-9
V1.4	d	1-9
V1.5	e	1-9
V1.6	f	1-9

4. RESULTADOS Y OBSERVACIONES

4.1. Limitaciones a alta frecuencia

El primer paso del algoritmo que se presenta, como se ha mencionado anteriormente, es el cálculo de las funciones de transferencia.

Como muestra (4), la matriz H depende de la frecuencia ω entre otros parámetros. Representando gráficamente los valores teóricos de H según (4) y comparándolos con los valores obtenidos para la misma aplicando el principio de reciprocidad podemos establecer una relación con la frecuencia, ver Fig. 8.

Para frecuencias superiores a 2 kHz, la función de transferencia medida u obtenida mediante reciprocidad tiende a ser inestable, alcanzándose una diferencia de 20 Pa·s·m⁻³ con respecto a la función de transferencia teórica. Por debajo de los 800 Hz, puede apreciarse una ligera diferencia inferior a 3 Pa·s·m⁻³ entre ambas funciones. Según esto podemos establecer que el modelo presentado es válido para frecuencias entre 800-2000 Hz.

Por otro lado, en secciones anteriores se indicaba la relación del modelo con el número N de fuentes desconocidas y el número M de presiones en la posición receptor. En este sentido el número de condición de la matriz H puede ser un buen indicador para la validación de los resultados. El número de condición se define como

$$\kappa(H) = \|H\| \|H^{-1}\| = \sigma_{\max}/\sigma_{\min} \quad (5)$$

donde σ_{\max} y σ_{\min} son los valores singulares máximos y mínimos de H y $\| \cdot \|$ denota la matriz normal.

Figura 8. Función de transferencia H teórica y medida.Figura 9. Número de condición de la función de transferencia H .

La importancia del número de condición $\kappa(H)$ está en su influencia directa en el error de la solución del vector complejo Q cuando se producen errores en la medida del vector complejo P . Esto puede demostrarse empleando las propiedades de las matrices, como por ejemplo, si el vector P es perturbado por una cantidad δP , entonces el vector Q también se ve afectado por una perturbación δQ , donde $H(Q + \delta Q) = P + \delta P$, puede ser escrito en la forma

$$\frac{\|\delta Q\|}{\|Q\|} \leq \kappa(H) \frac{\|\delta P\|}{\|P\|} \quad (6)$$

De esta manera, pequeños errores en el vector P se ven amplificados en el vector Q por una cantidad directamente proporcional al número de condición de la matriz H . Por lo tanto, se puede afirmar que el número de condición es un buen indicador para la validación de los resultados y que cuanto más pequeño sea el número de condición menor será el error cometido. La figura 9 representa el número de condición de la matriz H en función de la frecuencia para los casos en estudio. Por debajo de 1 kHz, los números de condición de las funciones de transferencia de los modelos con 12 y 24 monopolos decrecen hasta 3 y 6 respectivamente. El número de condición para el modelo con 24 monopolos incrementa alcanzando un valor de pico de 5000 a 4 kHz siendo inestable a partir de 1.2 kHz. Estas observaciones muestran que el modelo con 24 descriptores se debe evaluar en la franja de frecuencias 800-2000 Hz tal y como habíamos indicado anteriormente al comparar las funciones de transferencia teórica y medida para este modelo. Exceptuado este modelo, el resto presentan comportamientos

similares con la frecuencia. Por debajo de 1.5 kHz el número de condición de la matriz de transferencia decrementa cuando la frecuencia incrementa. Esto quiere decir que los pequeños valores singulares empiezan a ser significativos a partir de esta frecuencia. Por encima de 1.5 kHz, el número de condición es estable aunque con distintos valores dependiendo del tipo de modelo. El menor número de condición lo presenta la configuración de dos monopolos en horizontal. Sin embargo, el peor condicionamiento lo presentan las configuraciones con 12 y 24 monopolos.

4.2. Dependencia con respecto a la posición receptor

Evaluar la calidad del sonido en una determinada posición receptora requiere métricas específicas. Desde 1990, se han llevado a cabo numerosos trabajos para mejorar las herramientas de análisis de sonido que consideren las propiedades psicoacústicas del mismo. Una de estas herramientas es el espectrograma en el dominio tiempo-frecuencia aunque presenta una importante limitación ya que la señal es representada en decibelios "*Sound Power Level*" (SPL). Es decir, a pesar de suministrar una medida objetiva de la intensidad del sonido, ésta no es una propiedad que muestre la impresión subjetiva de un sonido tal y como lo escucharía una persona en una determinada posición. Para lograr esta sensibilidad del oído humano deben tenerse en cuenta los niveles de sonido para los distintos componentes de frecuencia y su adaptación al fenómeno de sensación sonora del oído humano. Este tipo de información aparece en las curvas "*loudness*" del oído humano (Gelfand, 1998). Estas curvas muestran que el oído es menos sensible a sonidos de bajas frecuencias, teniendo la máxima sensibilidad entre 3-4 kHz. Dichas curvas se emplean para relacionar la intensidad SPL a la escala de fonios. Una desventaja de la escala de fonios es que no es directamente proporcional al "*loudness*" percibido, y por lo tanto el doble del valor "*loudness*" en fonios no significa el doble del sonido "*loudness*". Finalmente, la escala Sone fue introducida para suministrar una escala lineal del "*loudness*" (Wonho, 1999). La figura 10 muestra la conversión de una señal en el dominio del tiempo a una representación que relaciona su "*loudness*" en términos de Sone.

Hay varias estrategias para implementar una representación de la sensación sonora (Timoney et al., 2004). Posiblemente la más conocida sea la propuesta por Zwicker. Esta forma parte del estándar internacional DIN 45631/ISO532B (Zwicker et al, 1984) y es la seleccionada en la presente investigación para cuantificar la calidad del sonido.

La principal limitación en las técnicas de identificación es que el número de fuentes tiene que ser muy inferior al número de micrófonos para obtener una resolución óptima ya que se sobredetermina al sistema, resultando por lo tanto un proceso de medida costoso y difícil. En este trabajo se estudia un número variable de monopolos y un número fijo de micrófonos 24 en campo cercano y 6 en campo lejano (Fig. 4), comparando el error cometido para los distintos casos en estudio.

La figura 11 muestra los espectrogramas de sensación sonora del error cometido para todos los casos considerados en esta investigación. Cada pixel del espectrograma indica el error en total "*loudness*" para cada configuración de monopolos estudiada, ver Fig. 7, y en cada una de las posiciones receptoras mostradas en la Fig. 5. A partir de esta figura está claro que en

los modelos con configuración de 24 y 12 monopolos el error cometido es mayor que en el resto de configuraciones. Esto ya se puso de manifiesto analizando el número de condición. Por otro lado, se puede apreciar que todos los casos estudiados con distinta configuración de fase muestra el mismo patrón de error, excepto el modelo V1.1 que presenta algunas diferencias.

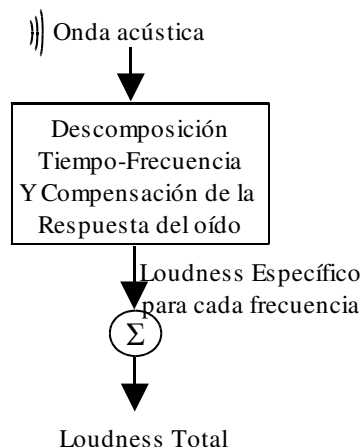


Figura 10. Algoritmo del espectrograma "*loudness*".

Por ejemplo, en el micrófono 3 situado a 1,5 m se observa siempre un error superior al que muestran los micrófonos situados a una distancia mayor como los micrófonos 4, 5 y 6 situados a 3 y 3,5 m respectivamente. Esto puede explicarse por el ángulo en el que se encuentra situado el micrófono que se ve influenciado por las configuraciones de fase del ruido estudiado. Los dos micrófonos situados en posición binaural, ambos a la misma distancia de la fuente, presentan también errores distintos.

Del mismo modo que en el caso anterior esto podría explicarse por el ángulo. Si observamos el modelo V1.1 podemos comprobar que el error es proporcional a la distancia de la posición receptora presentando un error mayor el micrófono 4 situado a 3,5 m ya que todos los altavoces tienen la misma fase. El modelo V1.6 es el que presenta un error menor inferior a 2 en la escala del total "*loudness*" ya que solo hay tres altavoces activos, el resto no emiten ruido, y todos con la misma fase.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presenta un proceso de identificación experimental del ruido producido por el motor de un automóvil. Se muestra que mediante un modelo ASQ es posible identificar fuentes sonoras con una exactitud aceptable para los propósitos de síntesis de sonido y a un coste computacional bajo. Se utilizó la técnica de sustitución mediante monopolos en el modelo ASQ cuantificando los descriptores de presión acústica necesarios para obtener una buena identificación de la fuente. Otros trabajos (Berckmans et al, 2010) muestran los beneficios de este método con respecto a las técnicas de "*Sound Intensity*" y de "*Acoustic Holography*" cuantificando la precisión de éste con respecto al número de monopolos utilizados para el ruido por rodadura.

Figura 11. Espectrograma del error en total "Loudness", ver Tabla 1.

Se han mostrado las limitaciones que presenta el método con respecto a la frecuencia y al número de descriptores siendo válido en el rango de frecuencias 800-2000 Hz, ya que se produce un comportamiento inestable fuera de este rango de frecuencias y conforme aumenta el número de descriptores el número de condición también aumenta, se amplifica el error comentado en la identificación. Puede observarse como la cuantificación del número de descriptores tiene una gran influencia sobre el "loudness" del espectro predicho. Hasta con 8 monopolos se consigue un error inferior a 2 en la escala del total "loudness" en todos los casos estudiados.

Otra limitación que presenta el método es la dependencia con respecto a la posición receptor cuando se modifica la fase del sonido emitido por los altavoces. Aparece un mismo patrón del error, obteniéndose una identificación peor de la fuente en el micrófono a 1,5 m.

La principal contribución del trabajo es la cuantificación del número de descriptores mínimos necesarios y la evaluación de la posición relativa del observador con respecto a la fuente de ruido para obtener la precisión requerida en este tipo de modelos, así como el rango de frecuencias de interés para la auralización del sonido en este modelo.

Finalmente se ha utilizado una métrica basada en el estándar internacional DIN 45631/ISO532B para la representación de los resultados tal y como los percibiría un observador, lo que nos ha permitido cuantificar la calidad del sonido identificado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación de la Katholieke Universiteit Leuven a través de una colaboración con el Grupo de Investigación de Ruido y Vibraciones de dicha Universidad bajo la supervisión del profesor Paul Sas.

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.
- Berckmans, D., Kindt, P., Sas, P., and Desmet, W. (2010). Evaluation of substitution monopole models for tire noise sound synthesis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **24**, 240-255.
- Biagiola, S. I., Figueroa, J.L. (2009). Identificación robusta de modelos Wiener y Hammerstein. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, **6** (2), pp 98-107.
- Billingsley, J., Kinns, R. (1976). The acoustic telescope. *Journal of Sound and Vibration* **48** (4).
- Crocker, M. J. (1983). Experimental methods for identifying sound sources on a machine, *Archiver of Acoustic* **8**, pp 293-316.
- 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.
- Fedorov, V.V. (1972). *Theory of optimal experiments*. New York, London: Academic Press.
- García-Nieto, S, Salcedo, J.V., Blasco, X., Martinez, M. (2009). Sistema de Control Borroso para el Proceso de Renovación de la carga en motores turbodiesel. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **6** (2), pp 36-48.
- Gelfand, S. A., (1998). *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustic*. Marcel Dekker.
- Goodwin, G. C. & Payne, R. L. (1977). *Dynamic system identification: Experiment design and data analysis*. New York: Academic Press.
- Haro, E (2008). Estimación de los parámetros físicos de un automóvil. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **5** (4), pp 28-35.

- Hildebrand, R., & Gervers, M. (2003). Identification for control: Optimal input design with respect to a worst case v-gap cost function. *SIAM Journal on Control and Optimization*, **41**(5), 1586-1608.
- 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.
- Jansson, H., & Hjalmarsson, H. (2005). Input design via LMIs admitting frequency-wise model specifications in confidence regions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **50**(10), 1534-1549.
- 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 source 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*, **23**, pp. 476-488.
- Rayess, N., and Wu, S.F. (2000). Experimental validations of the helmholtz 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.
- Timoney, J., et al., (2004). Implementing Loudness models in Matlab, *Proceeding of the 7th International Conference on Digital Audio Effects*, Italy.
- 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 International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven.
- Verheij, J.W., Hoebrichts, 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 from 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.
- Whittle, P. (1973). Some general points in the theory of optimal experimental design. *Journal of the Royal Statistical Society*, **35** (1), 123-130.
- 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.
- Zwicker, E., Fastl, H., Dallmayr, C. (1984). *Basic program for calculating the loudness of sounds from their 1/3 oct band spectra according to ISO 532 B*, *Acustica*, **55**, pp. 63-67