

Modelo de predicción de ruido industrial

J. Herreros, E.G. Vadillo y C. Angulo

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela T.S. de Ingenieros Industriales
y de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad del País Vasco,
Alameda de Urquijo s/n, 48013 Bilbao, España*

M. Van Overmeire

*Dienst Werktuigkunde en Akoestiek, Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2
B-1050 Bruselas, Bélgica*

1 INTRODUCCION

En los últimos años se han desarrollado numerosos códigos computacionales que permiten simular los problemas acústicos más habituales en el interior de recintos cerrados. Algunos de estos códigos están basados en técnicas puramente analíticas, como ACOUSALLE [1], y otros en técnicas de trazado de rayos, como RAYNOISE o RAMSETE [2], o en el método de la imagen especular de la fuente como, por ejemplo, CCISM [3]. Algunos de estos códigos son empleados para el estudio acústico de talleres, permitiendo simular los niveles de presión sonora (SPL) finales en función de la posición de la maquinaria, de la distribución de material absorbente, de la colocación de pantallas acústicas, etc. Entre las prestaciones de estos paquetes frecuentemente se incluye la información sobre tiempos de reverberación, sobre enmascaramiento de la megafonía, etc. El elemento diferenciador de los problemas de recintos industriales es el bajo coeficiente de absorción de las paredes, lo cual implica una problemática numérica distinta al de otro tipo de recintos o salas.

En este trabajo se presenta un código computacional (ECHOTEST) realizado por los autores del artículo, y destinado al cálculo y simulación de los niveles de ruido en el interior de talleres industriales. El código está basado en la técnica de la imagen especular de la fuente, y ha sido aplicado con éxito al estudio del ambiente acústico de un taller de fabricación mecánica. En el artículo se muestra la técnica empleada por los autores para mejorar los resultados en los casos de muy bajo coeficiente de absorción.

Como es sabido, las técnicas basadas en la propagación de rayos sonoros asumen que las frecuencias de interés tienen asociadas unas longitudes de onda sensiblemente inferiores a las dimensiones del local. Para frecuencias de interés más bajas sería necesario considerar el comportamiento modal del recinto.

ECHOTEST es un paquete modular que trabaja en tercios de octava y se basa en la consideración conjunta de los fenómenos de propagación directa del ruido desde cada una de las máquinas en funcionamiento o fuentes acústicas, así como de las sucesivas reflexiones en 3-D contra las paredes, techo, suelos y obstáculos, con sus respectivos coeficientes de absorción. El modelo considera además, también en 3-D, la difracción del ruido alrededor de los obstáculos y pantallas acústicas.

La difracción del sonido alrededor de los obstáculos es un aspecto que habitualmente se relega en acústica de interiores (véase, p. ej., Kuttruff[4]). Ello se debe a que su influencia en el SPL que llega a una determinada zona es sensiblemente inferior a la influencia del ruido directamente transmitido desde las fuentes, así como del ruido que llega tras haber sufrido diversas reflexiones. Sin embargo, en el caso de talleres, a diferencia de otros problemas de acústica de salas, resulta de primordial importancia disponer de pantallas acústicas, y conocer el sonido que se transmite tras ellas. Para esos casos, la aportación de ruido que llega tras un proceso de difracción, puede ser el factor prioritario, por delante de la aportación debida a las reflexiones sucesivas.

ECHOTEST calcula la propagación directa desde las fuentes hasta los receptores, o bien la aportación debida a la difracción. Un tratamiento riguroso de los posibles métodos para estimar la difracción puede encon-

trarse en Skudrzyk[5]. ECHOTEST calcula la difracción a partir del Número de Fresnel N_f (Norton[6]) obtenido según:

$$N_f = \frac{2\delta_1}{\lambda} \quad (1)$$

donde δ_1 , es cada vez la diferencia de longitud entre el camino recorrido por el sonido por propagación directa y el obligado a recorrer por difracción, y λ es la longitud de onda de cada banda de tercio de octava. Para la implementación se ha considerado la difracción del ruido alrededor de todas las caras principales de pantallas u obstáculos como se ve en la figura 1. En este caso, la atenuación A_T en dB lograda por la existencia de un obstáculo como el de la figura viene expresada por:

$$A_T = -10 \log_{10} (10^{-A_1/10} + 10^{-A_2/10} + 10^{-A_3/10}) \quad (2)$$

donde A_1 , A_2 , y A_3 son las atenuaciones individuales obtenidas por cada uno de los caminos principales de transmisión.

ECHOTEST permite también la consideración de las características propias del medio en el interior del taller, y en particular del grado de humedad.

2 DEFINICION DE LAS FUENTES

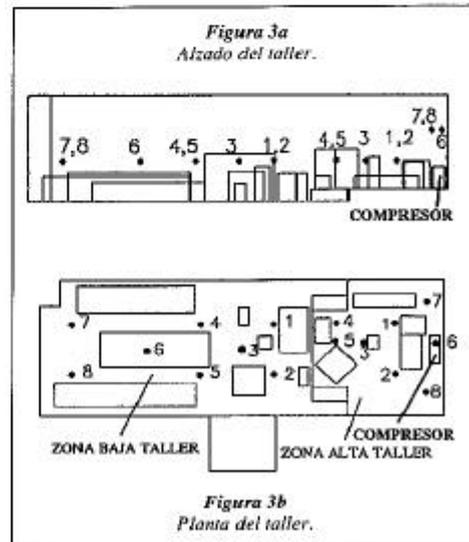
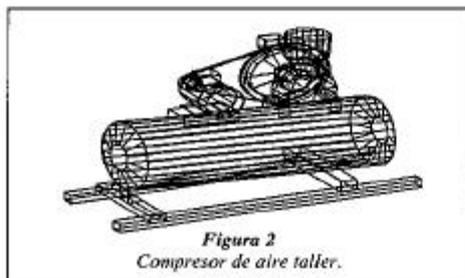
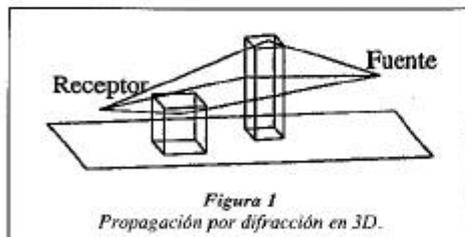
Los entornos industriales se caracterizan por la complejidad de sus fuentes acústicas. En general, la potencia de emisión se encuentra distribuida a lo largo de la superficie de las máquinas, con variaciones importantes de potencia acústica, de espectro y de directividad, en cada una de las zonas de una misma máquina.

Un ejemplo habitual en todos los talleres mecánicos es un compresor de aire como el de la figura 2, que permita suministrar aire a presión en todas las tomas distribuidas por el taller. Para una máquina de este tipo las fuentes de ruido incluyen el motor eléctrico, el compresor alternativo, y el depósito, cuya superficie provoca una importante radiación acústica.

De cara al empleo de un paquete como ECHOTEST, una definición excesivamente minuciosa de las fuentes multiplica linealmente el tiempo computacional de ejecución. Glegg y Yoon propusieron, para el caso de fuentes por encima de una superficie reflectante [7], y para aplicaciones de ruido debido al tráfico de carretera alrededor de una pantalla [8], la sustitución de la fuente dispersa por una única fuente equivalente en una posición y altura a determinar y_e , según la expresión (3):

$$y_e^2 = \frac{\int_s y_2^2 Q_e(\bar{y}, \omega) d\bar{y}}{Q_T y_2} \quad (3)$$

donde y_2 es la altura de las fuentes sobre la superficie reflectante, $Q_e(\bar{y}, \omega)$ es la potencia acústica efectiva, y Q_T es la potencia acústica total de la fuente.



Otro factor de interés se refiere a la directividad de la fuente, que en el caso de maquinaria industrial puede alejarse significativamente de la omnidireccionalidad. ECHOTEST tiene en cuenta la directividad de la fuente a efectos de computar la propagación directa de la fuente y a efectos del cálculo de las reflexiones. Para un ejemplo como el del compresor de taller, la potencia acústica y su directividad se han obtenido a partir de medidas de intensidad acústica, obteniéndose las directividades en dos planos perpendiculares.

3 EJEMPLO DE APLICACION

El ejemplo empleado para la validación del modelo ha consistido en un taller de mecanizado que dispone de una serie de máquinas-herramienta (dos células flexibles, tornos, fresadoras, una brochadora, varios robots industriales, etc.) y de un compresor para alimentar la red de aire comprimido del taller. El equipamiento del taller tiene un consumo de aire comprimido tal que el equipo compresor debe funcionar de manera prácticamente continua, elevando de una forma muy importante el nivel de ruido. Su influencia es molesta por trabajar en ciclos, con niveles de emisión elevados durante la fase de compresión, convirtiéndose en la fuente de ruido prioritaria del taller.

La figura 3 muestra la forma del taller, tal como es introducida a ECHOTEST, así como la localización del compresor en el mismo. A partir de sus datos acústicos, y de los datos geométricos y acústicos de los materiales y paredes del taller, se ha obtenido el SPL que origina en una serie de puntos de interés repartidos por el taller que aparecen en la figura 3. El número de puntos de interés son 8 para una zona elevada del taller y otros 8 para una zona baja. En el caso del taller de la figura 3, los valores obtenidos mediante ECHOTEST, una vez promediados los 16 puntos, aparecen en la segunda fila de la tabla 1, ya reducidos a bandas de octava. La tercera fila de dicha tabla muestra los SPL medios correspondientes a los 16 puntos que han sido obtenidos en las mediciones.

Tabla 1. Niveles medios de SPL del taller

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Total
SPL medio simulado (dB)	65,1	65,9	66,9	64,9	66,4	63,7	61,3	54,2	73,7
SPL medio medido (dB)	65,8	65,4	65,4	64,7	66,6	65,6	63,4	56,7	73,9

4. TIEMPOS DE COMPUTACION

En la ejecución de problemas de acústica de interiores es predominante el tiempo empleado en computar las reflexiones frente al tiempo empleado en calcular la propagación directa o la difracción, que en la mayoría de los casos requiere un tiempo despreciable. Stephenson [9] comparó el tiempo consumido utilizando el método de la imagen especular frente al necesario en los métodos de trazado de rayo basados en técnicas estadísticas.

Es sencillo comprobar que los métodos basados en la imagen especular de la fuente requieren un tiempo de computación TC para obtener las aportaciones de un grado de reflexión i cuyo valor es proporcional a $N(N-1)^{i-1}$, siendo N el número de caras con que se modeliza el problema. Sumando la serie geométrica es simple demostrar que el tiempo total de computación necesario para calcular todas las aportaciones de ruido hasta un orden de reflexión i_0 , asciende a:

$$TC(i_0) = K [(N-1)^{i_0} - 1] N / (N-2) \quad (4)$$

siendo K una constante que depende del ordenador utilizado. En la práctica, el tiempo de computación será siempre menor debido a que con los algoritmos empleados no todas las combinaciones posibles entre las distintas paredes conducen a la obtención de un rayo reflejado.

Una de las mayores limitaciones de los paquetes informáticos como ECHOTEST consiste, por tanto, en los elevados tiempos de computación. Esta circunstancia obliga a elegir un grado máximo de reflexiones, que dependerá en cada caso de la complejidad del problema. Por lo tanto, los resultados obtenidos en la simulación quedarán por debajo de los niveles reales existentes. Esto es consecuencia de no considerar el resto de reverberación, es decir, la energía reverberante en el local debida a reflexiones de orden superior al máximo establecido.

Para un ejemplo concreto, la magnitud de ese resto de reverberación en función del número de reflexiones que se consideren, de hasta 190 reflexiones, para valores del coeficiente de absorción del orden de $\alpha = 0.07$, viene mostrada en la tabla 2. En la segunda fila de la tabla se indica ese resto de reverberación en tanto por ciento, y en la tercera fila se indica en dB, a partir de un valor inicial de 120 dB:

Tabla 2. Resto de reverberación para diferentes grados de reflexión

Grado reflexión	0	1	3	5	10	30	50	100	150	190
Resto rev (%)	100	93	80,4	69,5	48,4	11,3	2,6	7e-2	18e-4	1e-4
Resto rev (dB)	120	119,6	119,1	118,4	116,8	110,54	104,2	88,5	72,7	60,1

5 CONCLUSIONES

El método de trazado de rayos en base a la imagen especular de la fuente se presenta como un método eficaz para la predicción de niveles sonoros en interiores de talleres de producción. Su mayor inconveniente es el tiempo de computación, notablemente superior al requerido por métodos basados en técnicas estadísticas. Esta circunstancia es determinante cuando los coeficientes de absorción de las paredes son muy bajos, y obliga a establecer un orden máximo de reflexiones. El cálculo del tiempo de reverberación se ve fuertemente afectado por esta limitación, y es necesario acudir a la una técnica basada en la estimación del resto de reverberación para obtener un grado de precisión razonable.

6 AGRADECIMIENTO

Una parte de este trabajo ha sido financiada mediante el proyecto ERBCHRXCT930397 SAVANTE de la DGXII.

8 REFERENCIAS

- [1] Faist A. "Acousalle, a computer program with expertise for the planning and analysis of the acoustics of indoor spaces". En Computational acoustics and its environmental applications, Computational Mechanics Applications, Southampton, pp 189-196, 1995.
- [2] Farina, A. "Ramsete. A new Pyramid tracer for medium and large scale acoustic problems". Euro-Noise 95, Lyon, pp 55-60, 1995.
- [3] Dance, S.M. "An image-source method for modelling sound in arbitrary closed spaces" En Computational acoustics and its environmental applications, Computational Mechanics Applications, Southampton, pp 189-196, 1995.
- [4] Kuttruff, H. (1991). Room Acoustics, Elsevier Applied Science, London and New York.
- [5] Skudrzyk, E. (1971). The Foundations of Acoustics, Springer-Verlag, Wien and New York.
- [6] Norton, M. P. (1989). Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers, Cambridge University Press, Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney.
- [7] Glegg, S. A. L. & Yoon, J. R. (1990). Determination of noise source height, Part I: The measurement of equivalent acoustic source height above a reflecting surface, Journal of Sound and Vibration, 143(1), 19-37.
- [8] Glegg, S. A. L. & Yoon, J. R. (1990). Determination of noise source height, Part II: Measurement of the equivalent source height of highway vehicles, Journal of Sound and Vibration, 143(1), 39-50.
- [9] Stephenson U. (1990). Comparison of the Mirror Image Source Method and the Sound Particle Simulation Method, Applied Acoustics, 29, 35-72