

IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS EN RECINTOS INDUSTRIALES

Víctor H. Cortínez^{a,b} y Martín E. Sequeira^a

^a*Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada (CIMTA), Universidad Tecnológica Nacional (FRBB), 11 de abril 461, 8000, Bahía Blanca, Argentina, vcortine@frbb.utn.edu.ar.*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Argentina.*

Palabras claves: ruido industrial, identificación, modelo de difusión.

Resumen. A los efectos de diseñar estrategias para mitigar situaciones de niveles sonoros excesivamente altos en recintos industriales, es menester conocer sus características acústicas tales como potencias sonoras de las fuentes y/o absorción de las superficies. En muchos casos tales magnitudes no son conocidas con precisión por lo cual deben obtenerse mediante medición directa. Tal tarea no es simple cuando la planta está en funcionamiento continuo. Una alternativa adecuada para estos casos es inferir las magnitudes de interés a partir del conocimiento del nivel sonoro en varios puntos de la sala utilizando un modelo teórico que relacione estas variables.

En este trabajo se propone este tipo de procedimiento mediante la utilización de un modelo acústico de difusión combinado con una técnica de optimización matemática, denominada recocido simulado, para la determinación de las potencias acústicas de las fuentes como así también los coeficientes de absorción del recinto. Como aspectos especiales de la metodología empleada, se evalúa su precisión en el proceso de identificación así como su velocidad de cálculo.

1 INTRODUCCIÓN

El ruido asociado a los procesos productivos, se ha convertido en un importante problema ocupacional que afecta a los operarios trabajando en recintos industriales. Por tal motivo el control de este tipo de contaminación constituye una actividad de gran importancia, más aun considerando las cada vez más exigentes regulaciones laborales (Gerges, 2004).

En general cualquier medida de control de ruido es precedida por un diagnóstico de la situación, lo que incluye un programa de medición y la evaluación de los resultados en base a la legislación establecida. Siguiendo a dicha etapa, deben diseñarse los procedimientos de control de ruido que pueden involucrar acciones organizativas o tecnológicas. Para tal fin es necesaria la utilización de un modelo de predicción del campo acústico que permita la evaluación del efecto de las posibles medidas a implementar.

Este modelo de predicción será realista en tanto se conozcan adecuadamente las condiciones acústicas pre-existentes, tales como potencias de emisión de las distintas fuentes, condiciones de absorción de los materiales involucrados, etc. Es decir, los resultados computacionales deben reproducir con suficiente precisión los valores obtenidos por medición directa (Luzzato et al. 1986; Guasch et al. 2002; Girón et al. 2005).

La manera ideal de identificar las potencias acústicas involucradas, mediante medición directa, sería detener todas las fuentes sonoras excepto aquella que se está analizando. Sin embargo, tal metodología no es generalmente aplicable por el enorme costo económico resultante de una parada en los procesos de producción.

En este trabajo se presenta un método para la identificación de las fuentes sonoras y características acústicas de las superficies interiores en recintos industriales complejos a partir de la determinación del campo acústico, mediante medición directa, considerando todas las fuentes actuando simultáneamente.

Tal conocimiento hace posible definir una función objetivo que evalúe la diferencia, de acuerdo a un criterio de mínimos cuadrados, entre estos valores medidos en forma directa y valores estimados a partir de un modelo de predicción acústica. Estos últimos dependen de los parámetros a estimar, en consecuencia la función objetivo deberá ser mínima.

Este problema inverso presenta ciertas dificultades debido a la existencia de varios mínimos relativos de la función a minimizar, lo que complica la aplicación de enfoques de optimización clásicos.

Por tal motivo, en este trabajo se propone la utilización del método heurístico de recocido simulado (Burkard et al. 1988). Tal procedimiento evita quedar “atrapado” en un mínimo local, ya que se trata de un método de optimización global.

Por otro lado, tal enfoque de optimización requiere el cálculo de una gran cantidad de situaciones para diferentes valores de las variables consideradas. En consecuencia es muy conveniente utilizar esta metodología con un modelo acústico preciso pero a la vez veloz desde el punto de vista computacional.

En algunos casos simples es posible utilizar fórmulas analíticas (Cortínez et al. 2007a, b). Sin embargo, la complejidad geométrica de los recintos industriales restringe en general su aplicabilidad.

Uno de los enfoques más utilizados para la determinación del campo acústico en recintos complejos es el método de trazado de rayos. A pesar de su gran éxito, los tiempos de cómputo asociados suelen ser importantes, al menos para tareas de identificación como la considerada aquí.

Recientemente los autores han propuesto un modelo alternativo basado en el uso de una red neuronal (Cortínez et al. 2009a). Esta metodología si bien resulta precisa y rápida, se elabora a partir de la determinación previa del campo acústico en una gran cantidad de

situaciones diferentes mediante el método de trazado de rayos. La elaboración de esta base de datos tiene un alto costo computacional.

A los efectos de la determinación del campo sonoro se propone un modelo de difusión acústica (Picaut et al. 1997), el cual puede ser fácil y rápidamente resuelto mediante el método de los elementos finitos para geometrías arbitrarias y condiciones de borde no homogéneas.

Este modelo se ha aplicado, con una aceptable precisión, para predecir los niveles sonoros en diversos ambientes acústicos interiores tales como recintos vacíos, recintos con diferentes densidades de objetos y recintos acoplados (Billon et al. 2006; Valeau et al. 2006; Valeau et al. 2007). Asimismo, se han realizado diferentes comparaciones entre el modelo de difusión y la técnica de trazado de rayos considerando recintos con geometrías complejas y distintos objetos en el interior, mostrando muy buenos resultados (Sequeira et al. 2009).

En este artículo, se aplica el enfoque conjunto descripto (método de recocido simulado-modelo de difusión acústica) para identificar las potencias acústicas de las fuentes sonoras y las características absorbentes de los materiales en recintos industriales a partir de la medición del campo sonoro en diferentes puntos del recinto. Se muestra que la metodología propuesta es simple en su utilización, y notablemente precisa aún considerando la existencia de errores de medición y/o de modelación.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE IDENTIFICACIÓN

En problemas relacionados con el ruido en recintos es conveniente describir el campo acústico interior empleando los niveles de presión sonora, los cuales están directamente vinculados a la sensibilidad del oído humano (Gerges, 2004).

Por lo tanto, dicho nivel se puede expresar, con suficiente generalidad, de la siguiente manera:

$$Lp_f(x, y, z) = F(Lw_{jf}, Q_{jf}, x_j, y_j, z_j, A) \quad (1)$$

Siendo $Lp_f(x, y, z)$ el nivel de presión sonora dado en cualquier punto del recinto y en la banda de frecuencia f , que depende del nivel de potencia sonora (Lw_{jf}) y de la directividad (Q_{jf}) de cada fuente j para cada banda de frecuencia f ; de las coordenadas de la fuente j (x_j, y_j, z_j) y de las condiciones acústicas del campo sonoro lejano (A). Estas últimas son función, principalmente, del coeficiente de absorción de las distintas superficies interiores y de las complejidades geometrías del ambiente acústico que se esté considerando.

Para obtener los valores de Lp es necesario conocer los diferentes parámetros del argumento dados en la expresión (1). Sin embargo, muchos de estos parámetros no son suficientemente conocidos (por ejemplo la información relativa a las características acústicas de las fuentes pueden no ser las reales a partir del desgaste de los distintos componentes que conforman las mismas).

En estos casos se debe resolver un problema inverso, es decir, los valores desconocidos de los parámetros del modelo deben ser obtenidos a partir del conocimiento de los valores de Lp obtenidos mediante medición directa.

En tal sentido, es posible identificar todas las fuentes simultáneamente a partir de una cierta cantidad de receptores distribuidos dentro el recinto (Luzzato et al. 1986; Cortínez et al. 2007a; Cortínez et al. 2007b).

El problema de identificación consiste, entonces, en la determinación de las potencias sonoras de las fuentes y las características de los materiales interiores de tal manera que se minimice una función F que mide la diferencia, en un sentido de mínimos cuadrados, entre los valores “medidos” de los Lp y los obtenidos teóricamente (estimados) a partir del modelo de

difusión acústica. En la metodología presentada se considera que las ubicaciones de las fuentes sonoras son conocidas.

Consecuentemente la función objetivo F se expresa de la siguiente manera:

$$F = \sum_{i=1}^N (Lp_{f_i[\text{medidos}]} - Lp_{f_i[\text{estimados}]})^2 \quad (2)$$

donde $Lp_{f_i} = L_f(x_i, y_i, z_i)$ y N es el número total de receptores i . La minimización de tal función está sujeta a las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} Lw \min_j &\leq Lw_j \leq Lw \max_j, j = 1 : M \\ \alpha \min_k &\leq \alpha_k \leq \alpha \max_k, k = 1 : O \end{aligned} \quad (3)$$

siendo M el número total de fuentes j y O el número total de coeficientes de absorción α , en cada superficie del recinto.

3 MODELO DE DIFUSIÓN ACÚSTICA

Como se comentó previamente, la utilización del modelo acústico de difusión proporciona un método eficiente y de bajo costo computacional para abordar problemas referentes a la acústica de recintos.

Sin embargo, cuando se pretende implementar un enfoque de optimización como el presentado, los tiempos de cálculo pueden ser relativamente extensos en función de la necesidad de evaluar, mediante un proceso iterativo, diferentes escenarios posibles en busca de la solución más adecuada.

Recientemente, los autores han desarrollado una formulación cuasi-equivalente en dos dimensiones del modelo de difusión (MD), llamada desde aquí modelo de difusión simplificado (MDS), el cual presenta una precisión prácticamente equivalente con una notable reducción de los tiempos de cómputo (Sequeira et al. 2009).

En tal sentido, en esta sección se presentan las formulaciones para ambos modelos, los cuales serán utilizados para realizar las correspondientes simulaciones acústicas durante el proceso de optimización.

3.1 Modelo de difusión completo (MD)

Considerando la variación de la energía acústica del campo reverberante en un recinto de volumen V de acuerdo a la ley de Fick, el balance de energía puede ser expresado, en función de la densidad de energía sonora (w), mediante la siguiente ecuación de difusión (Valeau et al. 2006):

$$\frac{\partial w(x,y,z,t)}{\partial t} - D \nabla^2 w(x,y,z,t) + \sigma w(x,y,z,t) = q(x,y,z,t) \text{ en } V \quad (4)$$

donde D es el coeficiente de difusión acústica, σ es un término de absorción y $q(x,y,z,t)$ representa la potencia sonora por unidad de volumen generada por la ó las fuentes acústicas consideradas. Cada término en la ecuación queda expresado en función de las siguientes configuraciones:

$$\text{Para recintos vacíos} = \begin{cases} D = D_r = \frac{\lambda_r c}{3}, & \text{coef. de difusión del recinto} \\ \sigma = mc, & \text{absorción del aire} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Para recintos con objetos} = \begin{cases} D = D_t = \frac{D_r D_f}{D_r + D_f}, & \text{coef. de difusión total} \\ D_f = \frac{\lambda_f c}{3}, & \text{coef. de difusión en la zona con objetos} \\ \sigma = mc + \frac{c\alpha_f}{\lambda_f}, & \text{absorción del aire y de los objetos} \end{cases} \quad (6)$$

En ambos casos, los coeficientes de difusión consideran la morfología del recinto a través de la expresión clásica del camino libre medio, siendo $\lambda_r = 4V/S$ para recintos vacíos y $\lambda_f = 4V/S_f$ para recintos con objetos. Por otro lado, c es la velocidad del sonido (en m/s) y los subíndices r y f expresan las variables referentes al recinto y a los objetos distribuidos en el interior, respectivamente.

En el caso de recintos con objetos, el modelo permite la combinación de difusión debida a los objetos y a las superficies del recinto, mediante una expresión modificada de la constante de difusión (D_t). A su vez, el término de absorción σ , permite considerar la atenuación atmosférica (donde m es el coeficiente de absorción del aire) y la absorción proporcionada por los objetos dentro del recinto. En el caso de recintos vacíos, esta última absorción, es ignorada.

La ecuación (4) está sujeta a condiciones de borde, sobre las superficies, similares a las encontradas en problemas de transferencia de calor,

$$D \frac{\partial w(\mathbf{r}, t)}{\partial n} + hw(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (7)$$

siendo h el coeficiente de intercambio, el cual presenta diferentes expresiones en función del grado de absorción que se considere sobre las superficies (Jing et al. 2007; Billon et al. 2008):

$$h = \begin{cases} \frac{c\alpha}{4}, & \text{baja absorción } (\alpha < 0.2) \\ \frac{c \ln(1-\alpha)}{4}, & \text{alta absorción } (\alpha \geq 0.2) \end{cases} \quad (8)$$

donde α es el coeficiente de absorción considerado.

Finalmente, el nivel de presión sonora total se determina sumando las contribuciones del campo directo y del reverberante, este último obtenido a partir de la solución numérica estacionaria de $w(x, y, z)$. El campo acústico así resultante queda expresado de la siguiente manera:

$$L_p^{TOT}(x, y, z) = 10 \log \left\{ \rho c \left[\int \frac{q}{4\pi r^2} dV_s + w(x, y, z) c \right] / P_{ref}^2 \right\} \quad (9)$$

siendo $r = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2}$ y $P_{ref}^2 = 2e10^{-5}$.

Debe notarse que, en la aplicación de la fórmula (9), la contribución del campo directo se considera de manera activa en todo el recinto, atenuándose en función de la distancia recorrida debido al efecto de divergencia esférica. Esta hipótesis sólo es válida en aquellos casos donde la fuente se encuentra aislada y alejada de objetos, como por ejemplo en recintos vacíos.

En el caso de recintos con configuraciones complejas, la presencia de diferentes objetos y geometrías variadas limita la presencia del campo directo por el efecto de apantallamiento.

Sin embargo, la contribución de dicho campo es insignificante a determinada distancia de la fuente. En estos casos, la formulación anteriormente citada es válida.

No obstante, cuando la fuente se encuentra próxima a un objeto, es necesario establecer una distancia máxima de acción del campo directo y limitar dicha contribución. Es decir, si la distancia entre una fuente y un objeto cercano es menor a cierto valor, la contribución del campo directo se considera solo hasta el objeto en cuestión. En caso contrario, no se limita la acción del campo directo.

En tal sentido, en este trabajo se utiliza la expresión empírica del radio crítico, $r_c = (R/16\pi)^{1/2}$, siendo R la constante del recinto, como un indicador de cuán lejos de la fuente el campo directo es considerado.

3.2 Modelo de difusión simplificado (MDS)

La obtención del MDS se realizó aplicando un método tipo Kantorovich de reducción de ecuaciones diferenciales. Esta metodología presenta la ventaja de que solo parte de la solución es escogida “a priori” mientras que el resto de la misma es determinada de acuerdo con el carácter del problema (Cortínez et al. 1988; Cortínez et al. 1990; Laura et al. 1990).

En tal sentido, se decidió representar la variación de la densidad de energía reverberante, dependiente de dos funciones, una correspondiente a la variación en el plano G (x, y) y la otra considerando la variación en altura F (z). De acuerdo a lo expresado, se tiene:

$$w(r) = G(x, y) \times F(z) \quad (10)$$

Donde la función G se obtiene mediante el método de elementos finitos y la función F se construye a partir de un polinomio de segundo orden de la forma $F(z) = 1 + a_1z + a_2z^2$, considerando las condiciones de borde definidas en los dos planos extremos (piso y techo) a partir de los correspondientes coeficientes de absorción,

$$D \frac{dF(z)}{dz} = \pm hF(z) \quad (11)$$

Sustituyendo la expresión (10) en la forma estacionaria de la ecuación (4) se obtiene la función residual $\varepsilon(x, y, z)$. Haciendo tal función ortogonal con respecto a F se consigue la siguiente expresión:

$$\int_0^H D F^2 dz \nabla_p^2 G + \int_0^H D \left(\frac{d^2 F}{dz^2} \times F \right) dz G - \int_0^H \sigma F^2 dz G + \int_0^h q F dz = 0 \quad (12)$$

siendo H y h la altura de recinto y de la fuente, respectivamente y el término ∇_p representa el laplaciano en el plano. A partir de la expresión (12) se efectúan las siguientes definiciones:

$$D_{z1} = \int_0^H D F(z)^2 dz \quad (13)$$

$$D_{z2} = \int_0^H D \left(\frac{d^2 F(z)}{dz^2} \times F(z) \right) dz \quad (14)$$

$$\sigma_z = \int_0^H \sigma F(z)^2 dz \quad (15)$$

$$q_z = \int_0^h q F(z) dz \quad (16)$$

Luego, la expresión simplificada en dos dimensiones del modelo de difusión junto con las nuevas condiciones de borde queda expresada de la forma:

$$\begin{cases} D_{z1} \nabla_p^2 G + (D_{z2} - \sigma_z) G + q_z = 0 & \text{en } \Omega \\ D \frac{\partial G}{\partial n} = -h G D_{z1} & \text{en } p \end{cases} \quad (17)$$

donde Ω representa el dominio en el plano y p es el perímetro.

Finalmente, el nivel de presión sonora total se obtiene sumando la contribución del campo sonoro directo y del reverberante de la misma manera que en el MD, como se estableció en la expresión (9).

4 TÉCNICA DE OPTIMIZACIÓN: MÉTODO DE RECOCIDO SIMULADO

El método de recocido simulado es una técnica heurística de optimización combinatoria basada en una generación aleatoria de soluciones factibles cuya principal característica es la de evitar convergencia local en problemas de gran escala (Burkard et al. 1988; Lundy et al. 1986). El nombre de este método deriva de un proceso termodinámico de recocido (*annealing*), en el cual se somete un metal a una máxima temperatura de forma tal que se funda, luego se va disminuyendo la temperatura lentamente de manera que el metal fundido tienda a solidificarse hasta alcanzar un equilibrio térmico caracterizado por una energía mínima. Un esquema controlado de disminución de la temperatura evita defectos en el metal.

La optimización basada en esta técnica permite determinar diseños cuasi-optimales buscando la mejor solución sin necesidad de asegurar la correcta elección de un punto inicial de búsqueda como se requiere en los algoritmos basados en descenso del gradiente.

El algoritmo comienza definiendo una solución inicial X_0 dentro de la región factible del problema y genera sucesivamente, a partir de ella, nuevas soluciones que son aceptadas como actuales de acuerdo a un cierto criterio probabilístico definido como:

$$P = \begin{cases} 1 & \text{si } \delta < 0 \\ e^{-\frac{\delta}{kT}} & \text{si } \delta > 0 \end{cases} \quad (18)$$

Donde $\delta = f(X_{i+1}) - f(X_i)$, representa el cambio en la función objetivo f , k es un factor de escalamiento conocido como constante de Boltzmann y T es el parámetro conocido como temperatura.

A medida que el algoritmo avanza se va disminuyendo T de manera tal de acotar la probabilidad de aceptar soluciones factibles que no produzcan una mejora en la función objetivo. En la Figura 1 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo general del método de recocido simulado empleado, donde T_0 es la temperatura inicial (parámetro de control) y n es el número de iteraciones que se realizan manteniendo constante la temperatura.

La función que determina y controla el descenso de la temperatura, juega un rol fundamental en la eficiencia del método. En este trabajo, a diferencia del esquema geométrico habitualmente considerado, se utiliza una nueva estrategia (Vidal, 2003) para disminuir la

temperatura cuyo principal objetivo es obtener un equilibrio entre el tiempo final de ejecución del algoritmo y el número de búsquedas que realice el mismo. De esta manera se plantea la disminución de la temperatura de acuerdo al siguiente esquema:

$$T_{i+1} = \frac{T_i}{1 + T_i^2} \quad (19)$$

Con esta nueva propuesta se logra disminuir la temperatura más rápidamente al inicio del algoritmo. El efecto más importante de esto es evitar aceptar en un comienzo la mayoría de las soluciones factibles y en consecuencia reducir el elevado costo inicial que presentan la mayoría de estos algoritmos.

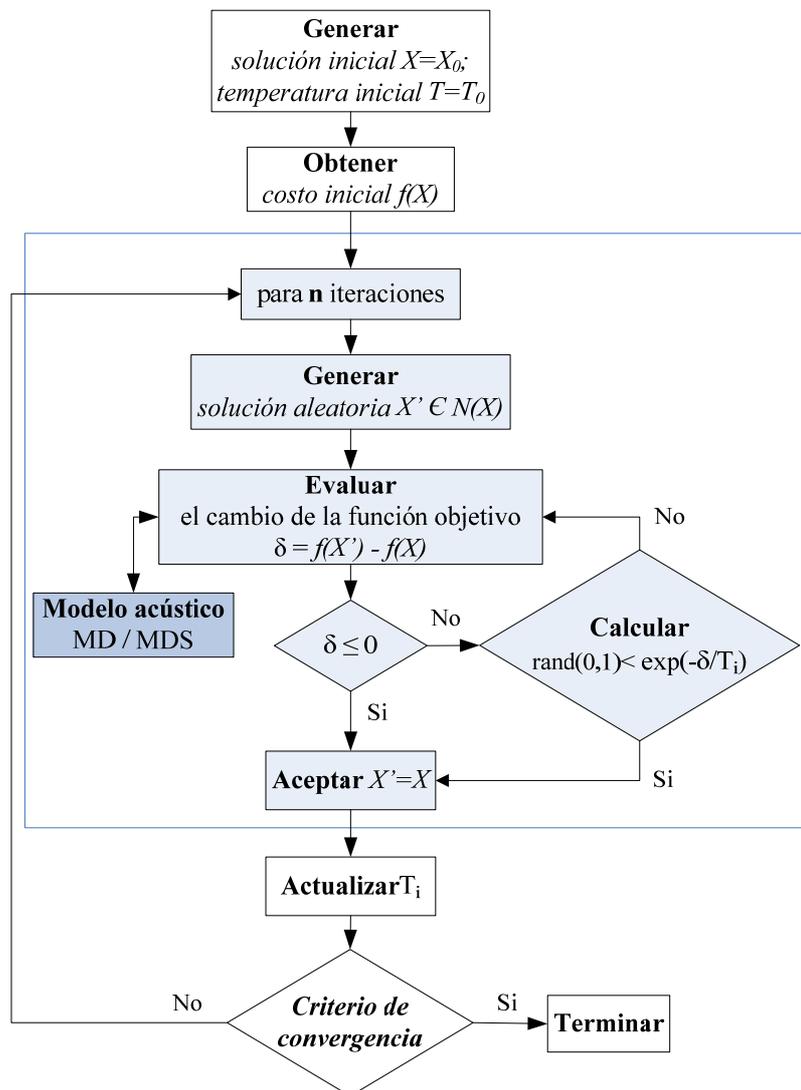


Figura 1: Diagrama de flujo del algoritmo Recocido Simulado empleado

5 RESULTADOS NUMÉRICOS: ESTUDIO DE CASOS

A los efectos de presentar la estrategia de optimización descrita, se consideraron dos configuraciones hipotéticas con características típicas de recintos industriales convencionales. En ambos casos, se eligieron como variables a identificar los niveles de potencia sonora (L_w)

de las fuentes y los coeficientes de absorción (α) de los materiales considerados en las superficies, correspondientes a la banda de 1000 hz. Es claro que el mismo procedimiento se puede utilizar considerando cualquier banda de octava dentro del rango de frecuencias medias y altas donde el modelo acústico tiene validez.

La metodología de optimización se implementó en el entorno Matlab®. Desde tal programa se invoca al código de simulación con el cual se resuelven las ecuaciones correspondientes al MD (o al MDS) a partir del método de elementos finitos. Para esta tarea se hace uso del software comercial Flex-PDE®. Como única limitación del cálculo por elementos finitos, se procura que cada elemento que conforma el mallado tenga un tamaño mínimo del orden de un camino libre medio del recinto analizado (Valeau et al. 2006).

Asimismo, se utilizó el software de simulación CATT-Acoustic® v8.0 para validar los resultados de los modelos de difusión. También se empleó tal programa para simular la tarea de medición. Es decir los valores L_p “medidos” utilizados durante el proceso de identificación fueron obtenidos mediante tal herramienta de simulación.

Este programa computacional utiliza un algoritmo de trazado de rayos nuevo el cual permite considerar configuraciones más complejas como ser recintos acoplados y geometrías inusuales (Summers et al. 2005). Las reflexiones sobre las superficies se consideraron completamente difusas de acuerdo a las características que presentan los materiales típicos utilizados en recintos industriales (Hodgson et al. 1991). Para cada ejemplo, se realizaron algunas simulaciones previas para determinar el número necesario de rayos sonoros y lograr una correcta predicción del campo sonoro.

5.1 Ejemplo 1: Recinto complejo con objetos distribuidos en su interior

En el primer ejemplo se considera un recinto complejo ($18 \times 15 \times 4$ m³) conteniendo 6 fuentes sonoras puntuales omnidireccionales y diversos obstáculos como ser una barrera interior y una zona con objetos distribuidos uniformemente con un volumen de ($6.75 \times 5.5 \times 3$ m³). En la figura 2 se observa un esquema del recinto analizado junto con las ubicaciones de las fuentes sonoras. Los valores de las potencias sonoras y ubicaciones de las fuentes y los diferentes coeficientes de absorción adoptados se muestran en la tabla 1 y 2, respectivamente.

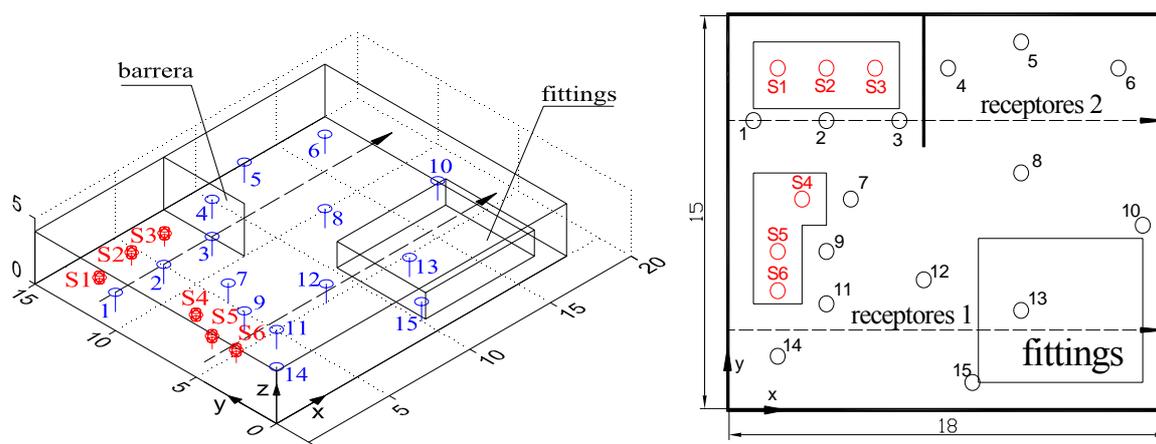


Figura 2: Esquema del recinto modelado ($18 \times 15 \times 4$ m³) con la ubicación de las 6 fuentes sonoras j (S_j), las líneas de receptores utilizados para la validación de los modelos de difusión (--) y los 15 puntos receptores considerados para la identificación (O)

Fuentes sonoras	L_w medido (dB)	Coordenadas (m)		
		x	y	z
S1	105	2	13	0.5
S2	102	4	13	1
S3	102	6	13	1
S4	100	3	8	0.5
S5	105	2	6	1
S6	108	2	4.5	1

Tabla 1: Niveles de potencia sonora y coordenadas de las 6 fuentes consideradas.

Superficie	α medido
Piso	0.02
Techo	0.5
Paredes	0.08
Barrera	0.15
Objetos (fittings)	0.30

Tabla 2. Coeficientes de absorción de los materiales utilizados en cada superficie.

5.1.1 Validación del modelo acústico (Ejemplo 1)

A los efectos de cotejar la precisión de los modelos de difusión, se realizaron comparaciones entre dichos modelos y el método de trazado de rayos en función de la distribución de los niveles L_p en 2 líneas de receptores ubicadas a una altura de 1.5 m en $y = 3$ m y en $y = 11$ m (ver figura 2).

Durante la simulación con el software CATT-Acoustic, se utilizaron 300×10^4 rayos sonoros y la zona con objetos se consideró mediante 30 bloques rectangulares distribuidos uniformemente con un camino libre medio $\lambda_f = 2.3$.

En la figura 3 se muestra la diferencia entre el MD y el MDS a partir de la distribución del campo sonoro a una altura de 1.5 metros. Se observa que las discrepancias entre ambos modelos son prácticamente nulas, con una diferencia máxima igual a 1.2 dB ubicada en la zona de objetos (fittings). El resto del campo sonoro no presenta diferencias sustanciales.

En la figura 4 se presentan los resultados numéricos obtenidos de la comparación realizada con el método de trazado de rayos. Se observa un buen ajuste entre los modelos de difusión (MD y MDS) y el modelo geométrico, con una diferencia promedio de 0.96 dB y un error máximo de 3.26 dB ubicado en la zona detrás de la barrera.

Los tiempos de computo promedios, para la banda de octava considerada, son del orden de 3700 segundos para el modelo de trazado de rayos, 25 segundos, para el MD y menos de 1 segundo para el MDS.

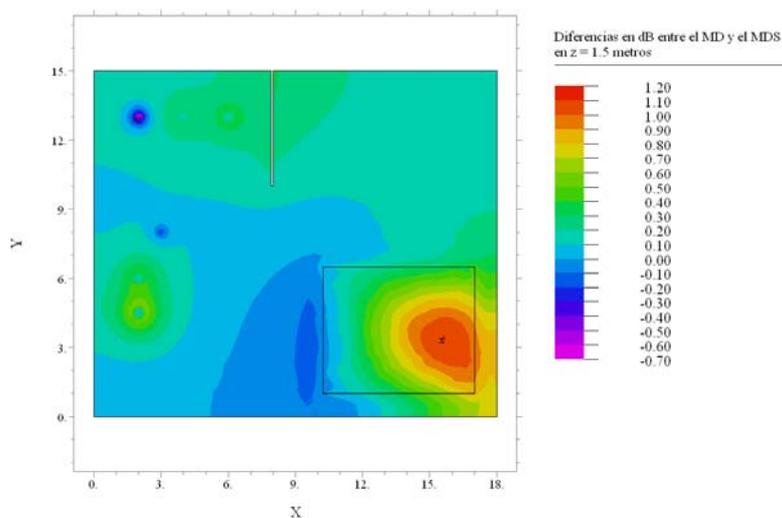


Figura 3: Diferencias en función de los niveles sonoros (dB) entre el MD y el MDS a una altura de 1.5 m

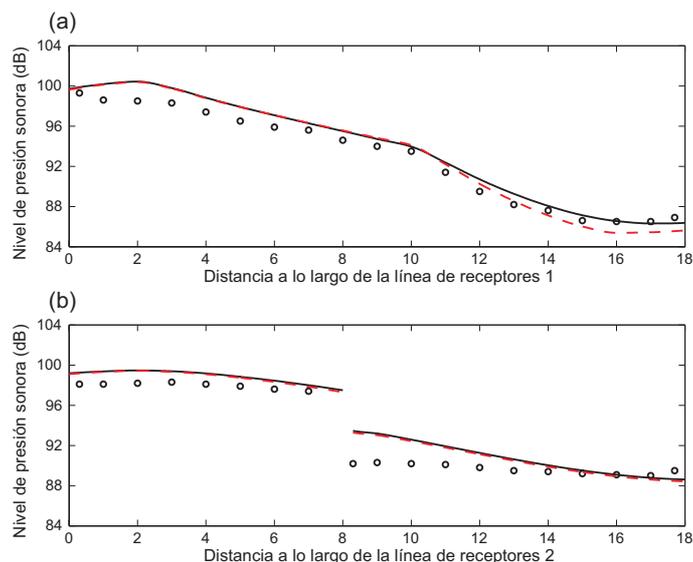


Figura 4: Comparación de los niveles de presión sonora en el recinto complejo entre el MD (—), el MDS (---) y el modelo de trazado de rayos (O): (a) SPL sobre línea de receptores 1 ($y = 3$ m). (b) SPL sobre línea de receptores 2 ($y = 11$ m)

5.1.2 Identificación (Ejemplo 1)

En esta etapa se procedió a realizar la identificación de los niveles de potencias sonoras de las 6 fuentes y de las características locales de absorción de las superficies.

Para ello se determinó a partir de medición directa, los valores de los L_p en los 15 puntos receptores ubicados a una altura de 1.5 m distribuidos en el recinto complejo. Estos últimos se muestran en la Figura 2. Como se ha comentado anteriormente, para simular tales resultados experimentales se hace uso de la técnica de trazado de rayos considerando los valores exactos para las variables consideradas.

Por otro lado, en una situación práctica real, existe cierto conocimiento general del rango de valores que pueden adoptar las variables a identificar. En tal sentido, en el presente trabajo,

dichos valores límites se eligieron tratando de contemplar un rango amplio a efectos de mostrar la robustez del método propuesto. En la tabla 3 se muestran los valores máximos y mínimos adoptados para cada una de las variables de diseño involucradas durante el proceso de optimización.

Variables	Valor min.	Valor máx.
Fuente 1 (S1)	100	110
Fuente 2 (S2)	97	107
Fuente 3 (S3)	97	107
Fuente 4 (S4)	95	105
Fuente 5 (S5)	100	110
Fuente 6 (S6)	103	113
α piso	0.01	0.1
α techo	0.30	0.8
α paredes	0.01	0.4
α barrera	0.01	0.4
α objetos	0.01	0.4

Tabla 3: Valores límites de las variables consideradas en el proceso de optimización.

En la tabla 4 se presentan los resultados de la identificación empleando ambos modelos de difusión acústica durante la técnica de optimización. Se observa, para ambos casos, una aceptable eficacia en el proceso de identificación.

Por otra parte, los tiempos de cómputo empleados fueron de 185.4 minutos (aprox. 3 horas) y de 8.97 minutos utilizando el MD y el MDS, respectivamente. El uso del MDS permite, para un mismo número de iteraciones, una reducción importante de los tiempos de cálculo con respecto al MD (del orden del 95 %).

Resultados	Variables					
	L_{w1} (dB)	L_{w2} (dB)	L_{w3} (dB)	L_{w4} (dB)	L_{w5} (dB)	L_{w6} (dB)
Valores medidos	105	102	102	100	105	108
Valores estimados con el MD	104.4	104.8	99.8	100.2	106.4	108
Diferencia abs.	0.6	2.8	2.2	0.2	1.4	0
Valores estimados con el MDS	104.6	100.8	103.6	100.4	107.6	106.6
Diferencia abs.	0.4	1.2	1.6	0.4	2.6	1.4
	α_{techo}	α_{piso}	$\alpha_{paredes}$	$\alpha_{barrera}$	$\alpha_{fittings}$	
Valores medidos	0.5	0.02	0.08	0.15	0.30	
Valores estimados con el MD	0.46	0.08	0.09	0.19	0.38	
Diferencia abs.	0.04	0.06	0.01	0.04	0.08	
Valores estimados con el MDS	0.52	0.02	0.12	0.15	0.27	
Diferencia abs.	0.02	0	0.04	0	0.03	

Tabla 4: Identificación de las 6 fuentes y los coeficientes de absorción de las distintas superficies en el recinto industrial complejo. Valor de la función objetivo (F) y tiempo CPU (t) utilizando a) el MD: F = 0.54; t = 3.09 horas. b) el MDS: F = 0.41; t = 8.97 minutos.

En la figura 5 se muestran los valores de la función objetivo a medida que el algoritmo

avanza, utilizando el MD y el MDS, respectivamente. Se observa en ambos casos que, en un comienzo se aceptan soluciones factibles que no mejoran el valor de la función objetivo, siendo éstas cada vez menos probables. Finalmente, alrededor de las 700 iteraciones se alcanza, en ambos casos, el valor mínimo.

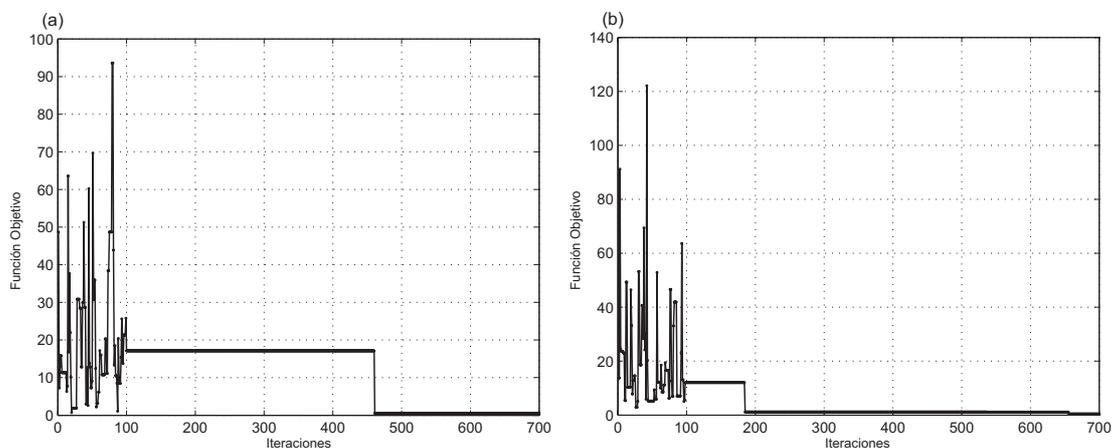


Figura 5: Convergencia de la función objetivo durante el proceso de identificación utilizando: a) el MD y b) el MDS

5.2 Ejemplo 2: Recinto con geometría variable

El siguiente ejemplo representa un recinto con una variación acentuada en su geometría indicando un acoplamiento fuerte. El esquema del recinto se presenta en la figura 6. En este caso, se consideraron 10 fuentes sonoras puntuales omnidireccionales cuyas ubicaciones y niveles de potencia se muestran en la tabla 5. Los coeficientes de absorción utilizados son $\alpha = 0.02$ en el piso y techo y $\alpha = 0.08$ en todas las paredes salvo en las superficies que conforma la partición cuyo $\alpha = 0.15$.

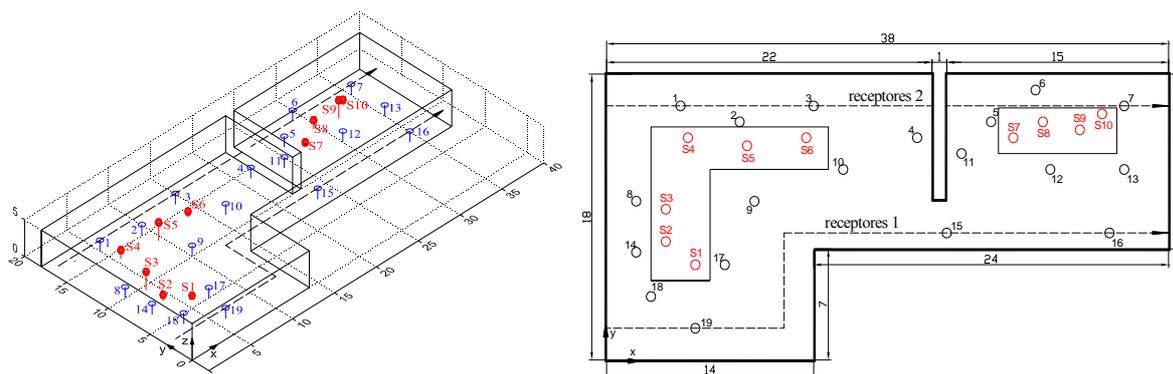


Figura 6: Esquema del recinto con geometría variable y locación de las 10 fuentes sonoras j (S_j), las líneas de receptores utilizados para la validación del modelo de difusión (--) y los 19 puntos receptores considerados para la identificación (O)

Fuentes sonoras	L_w medidos (dB)	Coordenadas (m)		
		x	y	z
S1	102	6	6	0.3
S2	105	4	7.5	0.8
S3	114	4	9.5	2.5
S4	101	5.5	14	1.2
S5	117	9.5	13.5	2.5
S6	100	13.5	14	0.8
S7	106	27.5	14	0.3
S8	102	29.5	15	1.2
S9	100	32	14.5	2.5
S10	110	33.5	15.5	0.8

Tabla 5: Niveles de potencia sonora y coordenadas de las 10 fuentes consideradas.

5.2.1 Validación del modelo acústico (Ejemplo 2)

Para validar los modelos de difusión se evaluó la respuesta del campo acústico a lo largo de las líneas de receptores 1 y 2 ubicadas a una altura de 1.5 metros. Estas últimas se muestran en la Figura 6.

Por otra parte, durante la simulación con el modelo de trazado de rayos, se utilizaron 80×10^4 rayos sonoros.

En la figura 7, se muestran las diferencias entre el MD y el MDS en función de la distribución de los niveles sonoros a una altura de 1.5 m. Nuevamente se aprecia que las diferencias entre el MD y el MDS son despreciables.

Al comparar con la técnica de trazado de rayos (figura 8), se observa una diferencia promedio del orden de 0.56 dB, con un error máximo de 1.27 dB.

Los tiempos de computo promedios son del orden de 2200 segundos para el modelo de trazado de rayos, 35 segundos, para el MD y menos de 1 segundo para el MDS.

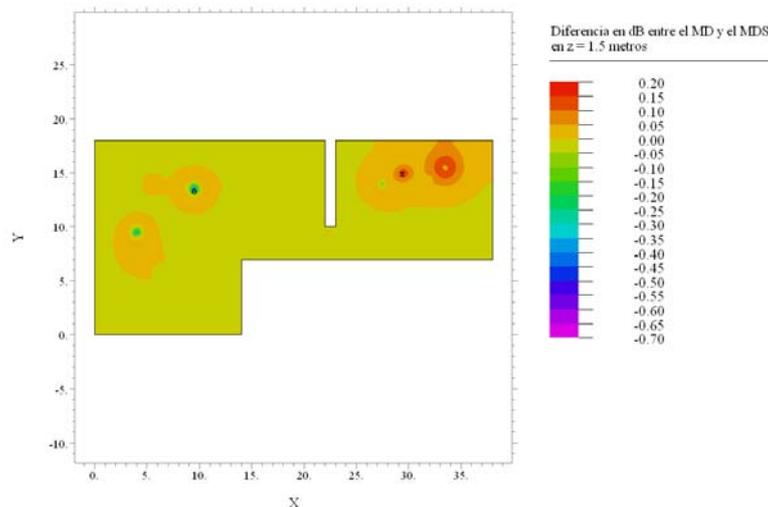


Figura 7: Diferencias en función de los niveles sonoros (dB) entre el MD y el MDS a una altura de 1.5 m

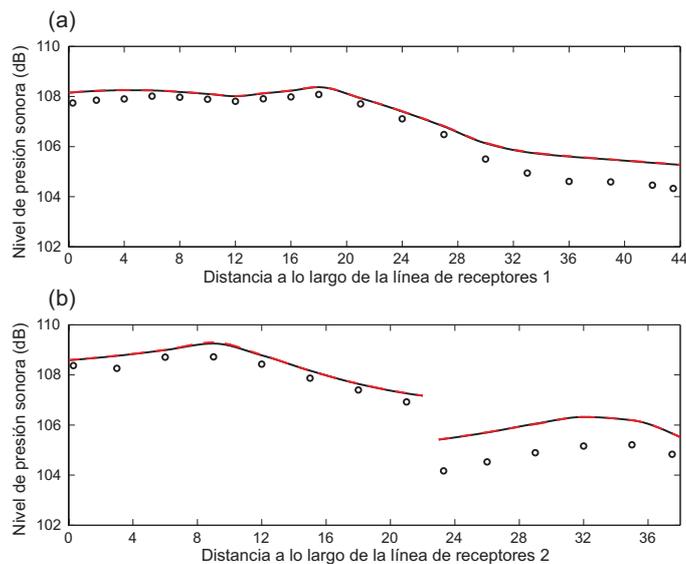


Figura 8: Comparación de los niveles de presión sonora en el recinto con geometría variable entre el MD (—), el MDS (---) y el modelo de trazado de rayos (O): (a) SPL sobre línea de receptores 1. (b) SPL sobre línea de receptores 2 ($y = 16$ m)

5.2.2 Identificación (Ejemplo 2)

En este caso se realizó la optimización utilizando únicamente el MDS debido a que los tiempos de cálculo empleados son notablemente menores que el MD y presenta prácticamente la misma eficacia de predicción. A los efectos de evaluar la función objetivo se consideraron 19 receptores distribuidos en el interior del recinto ubicados a una altura de 1.5 m (ver figura 6).

En la tabla 6 se presentan los valores máximos y mínimos adoptados para cada una de las variables de diseño involucradas.

Variables	Valor min.	Valor máx.
Fuente 1 (S1)	97	107
Fuente 2 (S2)	100	110
Fuente 3 (S3)	109	119
Fuente 4 (S4)	96	106
Fuente 5 (S5)	112	122
Fuente 6 (S6)	95	105
Fuente 7 (S7)	101	111
Fuente 8 (S8)	97	107
Fuente 9 (S9)	95	105
Fuente 10 (S10)	105	115
α piso	0.01	0.1
α techo	0.01	0.1
α paredes	0.01	0.4
α partición	0.01	0.4

Tabla 6: Valores límites de las variables consideradas en el proceso de optimización.

En la tabla 7 se presentan los resultados de la identificación de los niveles de potencias sonoras de las 10 fuentes y de las características locales de absorción de las superficies. Se

observa nuevamente una aceptable eficacia en la técnica implementada. En este caso, el tiempo de cálculo empleado fue de 25.66 minutos.

Debe aclararse que en el presente ejemplo, a partir de la cantidad de variables consideradas, se utilizó un número mayor de iteraciones durante el procedimiento de optimización. A pesar de esto, y como se puede apreciar en la figura 9, la función objetivo alcanza el valor mínimo alrededor de las 800 iteraciones, con un tiempo de cálculo similar al ejemplo anterior.

Resultados	Variables						
	Lw ₁ (dB)	Lw ₂ (dB)	Lw ₃ (dB)	Lw ₄ (dB)	Lw ₅ (dB)	Lw ₆ (dB)	Lw ₇ (dB)
Valores medidos	102	105	114	101	117	100	106
Valores estimados con MDS	103.4	104.8	112.4	103	116.6	99.4	104.6
Diferencia abs.	1.4	0.2	1.6	2	0.4	0.6	1.4
	Lw ₈ (dB)	Lw ₉ (dB)	Lw ₁₀ (dB)	α_{techo}	α_{piso}	α_{paredes}	$\alpha_{\text{partición}}$
Valores medidos	102	100	110	0.02	0.02	0.08	0.15
Valores estimados con MDS	101.4	97.6	108.4	0.01	0.03	0.06	0.15
Diferencia abs.	0.6	2.4	1.6	0.01	0.01	0.02	0

Tabla 7: Identificación de las 10 fuentes y los coeficientes de absorción de las distintas superficies en el recinto industrial con variación geométrica. Valor de la función objetivo (F) y tiempo CPU (t) utilizando el MDS: F = 0.62; t = 25.66 minutos.

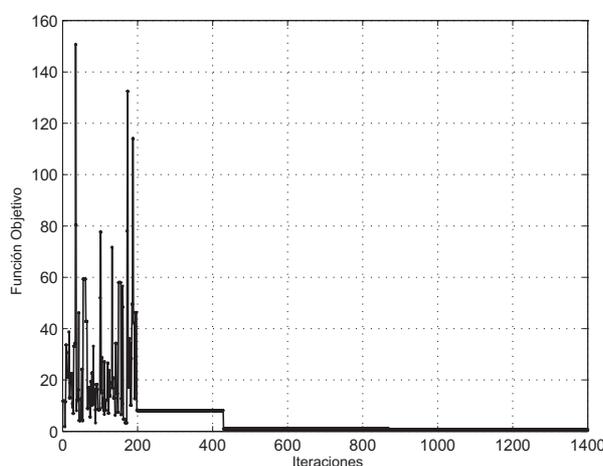


Figura 9: Convergencia de la función objetivo durante la identificación

6 CONCLUSIONES

Se formuló, mediante un enfoque de optimización, un método simple y efectivo para la identificación de fuentes y condiciones acústicas en recintos industriales multi-fuente.

Para ello, se utilizó un modelo acústico de difusión (MD) y una versión simplificada del mismo (MDS), en conjunto con el método heurístico de Recocido Simulado.

Asimismo, se utilizó la técnica de trazado de rayos implementado mediante el software CATT-Acoustic a los efectos de validar el modelo acústico de difusión y determinar los

valores “medidos” de los niveles sonoros (Lp) utilizados durante el proceso de identificación.

Durante la etapa de validación, se observó una gran similitud entre los modelos de difusión presentados (MD y MDS), mostrando una precisión prácticamente equivalente. Asimismo, al comparar dichos modelos con la técnica de trazado de rayos, se constató un adecuado ajuste, con una leve sobreestimación por parte del modelo de difusión en la predicción de los niveles sonoros. A pesar de esto, estas diferencias disminuyen a medida que más fuentes son consideradas, debido al incremento del campo sonoro reverberante, lográndose una mejor adaptación con la teoría de difusión.

Al comparar los tiempos de cómputo, el MD es, por lo menos, 10 veces más rápido que la técnica de trazado de rayos. Por su parte, el MDS presenta tiempos de cálculo, aproximadamente, 30 veces más rápidos que el MD, lo cual lo hace especialmente atractivo en el contexto de optimización presentado, debido a que tal proceso requiere efectuar un gran número de simulaciones (Cortínez et al. 2009b).

Finalmente, en la etapa de identificación, el problema de diseño se resolvió en forma exitosa a través de la implementación del método de recocido simulado en conjunto con los modelos de difusión aludidos. Para ejemplos convencionales la metodología implementada presenta tiempos de cálculo de unos pocos minutos.

Agradecimientos. Este trabajo es parte del proyecto “Contaminación Acústica en Ambientes Urbanos e Industriales” (Código: 25/B017, Director: Dr. V.H. Cortínez, Secyt, Universidad Tecnológica Nacional). Asimismo forma parte del trabajo de tesis desarrollado por M.E. Sequeira, bajo la dirección de V.H. Cortínez, para obtener el título de Dr. En Ingeniería en el departamento de Ingeniería de la Universidad del Sur. La participación de M.E. Sequeira en este trabajo se ha llevado a cabo gracias a una beca de posgrado otorgada por la Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS

- Billon, A., Valeau, V., and Sakout, A., On the use of a diffusion model for acoustically coupled rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120:2043–2054, 2006.
- Billon, A., Picaut, J., and Sakout, A., Prediction of the reverberation time in high absorbent room using a modified-diffusion model. *Journal of Applied Acoustics*, 69: 68–74, 2008.
- Burkard, R., and Rendl, F., A thermodynamically Motivated Simulation Procedure for Combinatorial Optimization Problems. *European Journal of Operational Research*, 17:169–174, 1988.
- Cortínez, V.H., and Laura, P.A., Further optimization of the Kantorovich method when applied to vibrations problems. *Journal of Applied Acoustics*, 25: 217–221, 1988.
- Cortínez, V.H., and Laura, P. A., Analysis of vibrating rectangular plates of discontinuously varying thickness by means of the Kantorovich extended method. *Journal of Sound and Vibration*, 137(3): 457–461, 1990.
- Cortínez, V., Vidal, M., y Girón, P., Optimización de las condiciones acústicas en recintos industriales. *Mecánica Computacional*, Vol. XXVI, 59-73, 2007a.
- Cortínez, V., Sequeira, M., y Vidal, M., Identificación de fuentes de ruido en ambientes urbanos industriales. *Contaminación Atmosférica en Argentina*. Eds: Enrique Puliafito y Nancy Quaranta. Publicación de la UTN, 2007b.
- Cortínez, V. H., y Sequeira, M. E., Un enfoque híbrido para el rediseño acústico óptimo de recintos industriales. *Mecánica Computacional* Vol. XXVIII, págs. 39-61, ISSN: 1666-6070, 2009a.
- Cortínez, V. H., y Sequeira, M. E., Diseño acústico óptimo en recintos industriales basado en

- un modelo de difusión. Actas de las Primeras jornadas Regionales de Acústica (Asociación de Acústicos Argentinos). Rosario, Argentina, 2009b.
- Gerges, S., y Arenas, P., *Fundamentos y control del ruido y vibraciones*, NR Editora, Florianópolis, SC, Brasil, 2004.
- Girón, P., Sequeira, M., Azzurro, A., y Cortinez, V., Control de ruido industrial mediante un modelo computacional: estudio de caso. *Mecánica Computacional*, Vol. XXIV: 2325-2341, 2005.
- Guasch, O., Magrans, F.X., and Rodriguez, P.V., An inversion modelling method to obtain the acoustic power of the noise sources in a large factory. *Journal of Applied Acoustics*, 63: 401–417, 2002.
- Hodgson, M., Evidence of diffuse surface reflections in rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89:765–771, 1991.
- Jing, Y., and Xiang, N., A modified diffusion equation for room-acoustic prediction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121:3284–3287, 2007.
- Laura, P. A., and Cortínez, V.H., Application of the optimized Kantorovich method to three-dimensional eigenvalue problems. *Journal of Sound and Vibration*, 140(3): 528–531, 1990.
- Lundy, M., and Mees, A., Convergence of an Annealing Algorithm. *Mathematical programming*, 34:111–124, 1986.
- Luzzato, E., and Lecointre, C., Some simple and effective methods for sound source identification with geometrical acoustic models. *Journal of Sound and Vibration*, 105:473–496, 1986.
- Picaut, J., Simon, L. and Polack, J.D., A mathematical model of diffuse sound field based on a diffusion equation. *Acta Acustica*, 83:614–621, 1997.
- Sequeira, M. E., y Cortínez, V.H., Un modelo de difusión acústica para recintos: comparación con el método de rayos. *Mecánica Computacional* Vol. XXVIII, p. 163-179, ISSN: 1666-6070, 2009.
- Sequeira, M. E., y Cortínez, V.H., Un modelo simplificado en dos dimensiones de difusión acústica, Aceptado para publicar en el 2nd Pan-American and Iberian Meeting on Acoustics, Cancún, Mexico, November 2010.
- Summers, J.E., Torres, R.R., Shimizu, Y., and Dalenbäck, B.I.L., Adapting a randomized beam-axis-tracing algorithm to modeling of coupled rooms via late-part ray tracing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118(3): 1491–1502, 2005.
- Vidal, M., Un procedimiento heurístico para un problema de asignación cuadrática. Tesis de Magister en Matemática, Departamento de Matemática, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, 2003.
- Valeau, V., Picaut, J., and Hodgson, M., On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119:1504–1513, 2006.
- Valeau, V., Hodgson M., and Picaut J., A diffusion-based analogy for the prediction of sound fields in fitted rooms. *Acta Acustica*, 93: 94–105, 2007.