

DISEÑO ACÚSTICO ÓPTIMO DE LA GEOMETRÍA DE SALAS DE CONCIERTO

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

^a*Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada (CIMTA), Universidad Tecnológica Nacional (FRBB), 11 de abril 461, 8000, Bahía Blanca, Argentina,*

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

Palabras claves: diseño acústico, salas de concierto, método de “simulated annealing”, tiempo de reverberación, modelo de difusión.

Resumen. El diseño de salas destinadas a la interpretación musical es muy complejo desde el punto de vista acústico, ya que cada tipo de música requiere un recinto con características acústicas específicas y diferenciadas. En los últimos años, se ha realizado un importante progreso en relacionar las valoraciones subjetivas sobre la calidad acústica de una sala con una serie de parámetros objetivos (físicamente medibles).

En este trabajo se propone la utilización de un modelo acústico de difusión combinado con la técnica de optimización simulated annealing (SA) para realizar el diseño preliminar de salas de concierto. Para ello, se pretende optimizar la forma geométrica y la distribución de material absorbente en las superficies del recinto, a partir de considerar valores adecuados de índices de calidad acústica tales como el tiempo de reverberación y la sonoridad.

1 INTRODUCCIÓN

El diseño de salas destinadas a la interpretación musical presenta una complejidad considerable desde el punto de vista acústico. No existe una única fórmula cuya utilización permite garantizar, a priori, la calidad acústica de un recinto (Isbert, 1998). Esto se debe principalmente a que la percepción humana del sonido depende de distintas magnitudes tales como el nivel sonoro en decibeles, la dirección de propagación y la atenuación con el tiempo, ninguno de los cuales son tangibles o visibles. Además, cada tipo de música requiere un recinto con características acústicas específicas y diferenciadas.

Históricamente, el tiempo de reverberación (RT) se ha considerado de vital importancia en el diseño de salas de concierto debido a que el sonido de la música se ve directamente afectado por este parámetro. Se define como el tiempo que transcurre, a una determinada frecuencia de interés, desde que el foco emisor se detiene hasta que el nivel de presión sonora decae 60 dB. La relevancia del RT en el estudio de acústica de salas se debe a que este parámetro depende de la densidad e intensidad de las reflexiones que se producen en el recinto, a lo largo del tiempo, luego del cese de la emisión sonora. Por supuesto las reflexiones serán básicamente definidas de acuerdo a las características geométricas de la sala y la absorción de los materiales presentes.

Otro parámetro que reviste importancia para caracterizar acústicamente una sala es el índice de sonoridad (G). La sonoridad se corresponde con el grado de amplificación producido por la sala y permite evaluar la distribución del sonido así como también determinar donde la energía transmitida es deficiente para alguna frecuencia. Este parámetro depende fundamentalmente de la posición del oyente y de la absorción y forma del recinto. Ambos parámetros (RT y G), en combinación, revisten gran importancia en el estudio de la acústica de salas de concierto (Beranek, 2011).

Se han realizado diversos estudios pretendiendo correlacionar la calidad acústica en salas con la impresión subjetiva del oído humano en busca de obtener valores óptimos de los distintos indicadores utilizados. En particular, los valores ideales de los indicadores G y RT , para salas vacías de concierto destinadas a música sinfónica, se encuentran entre 4 y 5.5 dB y 2 y 2.3 seg., respectivamente (Beranek, 2004).

En este trabajo se presenta un enfoque para realizar el diseño óptimo preliminar de la configuración geométrica de salas de concierto a los efectos de alcanzar condiciones de percepción acústica deseadas. Esto involucra la evaluación de los valores óptimos de los indicadores acústicos previamente mencionados en distintas posiciones en la zona de audiencia. Las variables de diseño contempladas durante el proceso iterativo corresponden a las dimensiones de la sala y a los materiales absorbentes utilizados en las superficies.

Esta metodología requiere la evaluación de una gran cantidad de situaciones para diferentes valores de las variables consideradas. En consecuencia, es muy conveniente utilizar un modelo acústico preciso pero a la vez veloz desde el punto de vista computacional. El enfoque clásico para estudiar la acústica de recintos es la teoría del campo difuso uniforme (Kuttruff, 2000). Por su simpleza y su relativa precisión ha sido empleada intensivamente por los ingenieros acústicos. Sin embargo, esta metodología arroja resultados imprecisos cuando la geometría del recinto bajo estudio presenta cierta heterogeneidad o la absorción en las superficies no es suficientemente uniforme. Esto se debe a que el nivel sonoro en la posición del receptor no sólo depende de la intensidad de la fuente y del tiempo de reverberación de la sala, sino que también de factores como la ubicación de la fuente y la forma del recinto.

Existen numerosos estudios en el área de la acústica de salas basados en datos experimentales. En particular, Barron (Barron and Lee, 1988) desarrolló un modelo simple que permite predecir el decrecimiento del sonido reflejado en función de la distancia a partir

de comparaciones entre mediciones directas y la teoría tradicional de la acústica de recintos. Sin embargo, dicho modelo sólo presenta resultados satisfactorios en recintos categorizados por el autor como “razonablemente difusos”.

También existen métodos alternativos basados en el uso de las redes neuronales (Cortínez y Sequeira, 2009; Nannariello and Fricke, 2001). Si bien esta metodología resulta precisa y rápida, se elabora a partir de la determinación previa del campo acústico en una gran cantidad de situaciones diferentes mediante algún modelo de razonable precisión o mediciones reales. La elaboración de esta base de datos tiene un alto costo computacional y la predicción del modelo resultante queda limitado al dominio de entrenamiento.

En años recientes, el uso de la técnica de trazado de rayos, basada en la acústica geométrica, ha crecido considerablemente debido a su capacidad de considerar geometrías complejas y diferentes condiciones acústicas interiores (Rindel, 2000; Monks et al., 2000). Sin embargo, esta técnica requiere información detallada sobre las condiciones de diseño y los tiempos de cómputo empleados pueden ser importantes.

Un nuevo modelo para la acústica de recintos fue propuesto hace algunos años (Picaut et al., 1997), el cual permite calcular la distribución del campo reverberante no uniforme en recintos, extendiendo la teoría de campo difuso. Un aspecto importante es que el problema queda gobernado por ecuaciones similares a las de transferencia de calor. Las ecuaciones propuestas por este enfoque pueden ser fácil y rápidamente resueltas mediante el método de los elementos finitos para geometrías arbitrarias y condiciones de borde no homogéneas. El modelo acústico de difusión (MAD), se ha aplicado con aceptable precisión, para predecir los niveles sonoros, en el rango de medias y altas frecuencias, contemplando diversos ambientes acústicos interiores (Billon et al., 2006; Valeau et al., 2006; Valeau et al., 2007; Jing and Xiang, 2008; Sequeira y Cortínez, 2009; Escolano et al., 2010).

Recientemente, los autores han desarrollado una formulación aproximadamente equivalente en dos dimensiones del modelo de difusión, denominado modelo de difusión acústica simplificado (MDAS), el cual presenta una precisión prácticamente equivalente al MDA, y tiempos de cálculo aproximadamente 30 veces más rápidos, lo cual lo hace especialmente atractivo en el contexto de diseño planteado como tema central en este trabajo (Cortínez y Sequeira, 2010).

Por otra parte, el problema de diseño resultante está caracterizado por la existencia de varios mínimos relativos, lo que dificulta la aplicación de técnicas clásicas de optimización, tales como aquellos basados en gradiente. En consecuencia, se propone utilizar el método de optimización global “simulated annealing” (Burkard and Rendl, 1988), que resulta especialmente apto para analizar problemas con variables discretas y no requiere el cálculo del gradiente de la función objetivo.

En este artículo, se aplica el enfoque conjunto descrito (método de recocido simulado-modelo de difusión acústica simplificado) para realizar el diseño óptimo preliminar en una sala de concierto destinada a música sinfónica a partir de considerar los valores óptimos recomendados de G y RT para el tipo de música mencionada. La presente metodología extiende un trabajo previo de los autores (Cortínez y Sequeira, 2009; Cortínez y Sequeira, 2010) a la optimización de la formas.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Usualmente, el tiempo de reverberación no presenta una variación espacial importante en salas de concierto (Klosak and Gade, 2008). Por tal motivo, en este trabajo se estima el RT mediante la fórmula de Sabine presentada en la ecuación (1). Donde V es el volumen del recinto, $\bar{\alpha}$ es el coeficiente de absorción promedio y S_{tot} es la superficie total de la sala, a la

que está expuesta la fuente sonora.

$$RT = 0.161 \frac{V}{S_{tot} \bar{\alpha}}, \text{ seg} \quad (1)$$

Por su parte, la sonoridad se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora L_p producido por una fuente omnidireccional en una posición cualquiera \mathbf{r} de una sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en el campo libre a una distancia de 10 m (denominado nivel de referencia). Cuando se utiliza una fuente con un nivel de potencia L_w conocido, G puede expresarse como (Nannariello and Fricke, 2001):

$$G(\mathbf{r}) = L_p(\mathbf{r}) - L_w + 31, \text{ dB} \quad (2)$$

Las variaciones del nivel de presión sonora G dependen fundamentalmente de las condiciones acústicas del campo sonoro lejano. Estas últimas son función, principalmente, del coeficiente de absorción de las distintas superficies interiores y de las dimensiones del recinto.

En este trabajo, a los efectos de implementar el correspondiente enfoque de diseño óptimo, se utilizan los valores de RT_{mid} y G_{mid} definidos como los promedios de los valores de tiempo de reverberación y sonoridad para las bandas de 500 y 1000 Hz, respectivamente.

Las variables de diseño consideradas son las dimensiones del recinto correspondientes a la zona de la audiencia: largo (L), ancho (W) y altura (H) y los coeficientes de absorción de los materiales utilizados en las paredes de la zona de escenario (α_{esc}), en las paredes de la zona de audiencia (α_{aud}) y en el techo (α_{techo}). En particular, la superficie del escenario y la absorción en el piso del escenario y la audiencia se presuponen fijas y conocidas.

El problema de optimización consiste, entonces, en determinar las mencionadas variables procurando minimizar una función OF que mide la diferencia, en un sentido de mínimos cuadrados, entre el valor óptimo de G_{mid} y los correspondientes valores presentes en distintos puntos de la zona de audiencia de la sala. Éstos son estimados a partir del modelo de difusión acústica. Consecuentemente el problema de diseño se formula de la siguiente manera:

$$(L^+, W^+, H^+, \alpha_{esc}^+, \alpha_{aud}^+, \alpha_{techo}^+, RT_{mid}^+) = \arg \min OF \quad (3)$$

donde la función objetivo se expresa en la forma:

$$OF(L, W, H, \alpha_{esc}, \alpha_{aud}, \alpha_{techo}, RT_{mid}) = \sum_{i=1}^N (G_{mid[\text{óptimo}]} - G_{mid[\text{estimado}]})^2 \quad (4)$$

siendo N es el número total de receptores i . El valor óptimo para G_{mid} se ha adoptado igual a 4.75 dB. La minimización de tal función está sujeta a las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} 18 \text{ m} \leq L \leq 70 \text{ m}, & \quad \alpha_{esc \min_k} \leq \alpha_{esc_k} \leq \alpha_{esc \max_k}, k = 1 : O, \\ 18 \text{ m} \leq W \leq 50 \text{ m}, & \quad \alpha_{aud \min_k} \leq \alpha_{aud_k} \leq \alpha_{aud \max_k}, k = 1 : O, \\ 5 \text{ m} \leq H \leq 24 \text{ m}, & \quad \alpha_{techo \min_k} \leq \alpha_{techo_k} \leq \alpha_{techo \max_k}, k = 1 : O, \\ 2 \text{ seg} \leq RT_{mid} \leq 2.3 \text{ seg}. & \end{aligned} \quad (5)$$

donde O es el número total de coeficientes de absorción adoptados para considerar en cada superficie del recinto (exceptuando el área de audiencia y el escenario) durante la optimización.

3 MODELO DE DIFUSIÓN ACÚSTICA

3.1 Modelo de difusión acústica completo (MDA)

Este modelo describe la distribución del campo reverberante no uniforme en recintos a partir de una analogía matemática entre la propagación del sonido en recintos con superficies reflectantes difusivas y la difusión de partículas de un medio gaseoso en un fluido difusivo.

A partir de esto, es posible obtener, para una posición $\mathbf{r} = (x, y, z)$ y una frecuencia f dentro de un recinto con volumen V , la densidad de energía sonora estacionaria $u_f(\mathbf{r})$, correspondiente al campo reverberante, como la solución del siguiente sistema de ecuaciones (Billon et al., 2006; Jing and Xiang, 2008):

$$D \nabla^2 u_f(\mathbf{r}) - \sigma u_f(\mathbf{r}) + w_f(\mathbf{r}) = 0 \quad \text{en } V \quad (6)$$

$$D \frac{\partial u_f(\mathbf{r})}{\partial n} + A_f c u_f(\mathbf{r}) = 0 \quad \text{sobre } \partial V \quad (7)$$

donde ∇^2 es el operador laplaciano, D es el coeficiente de difusión acústica, σ es un término de absorción volumétrica, w_f representa la potencia sonora por unidad de volumen generada por la fuente sonora en la frecuencia f y c es la velocidad del sonido. Cada término del modelo adopta diferentes expresiones en función de la configuración seleccionada. Para el caso de recintos vacíos, el coeficiente de difusión $D = \lambda c/3$ considera la morfología del recinto de superficie interior S a través de la expresión clásica del camino libre medio $\lambda = 4V/S$. El término de absorción (σ) tiene en cuenta la atenuación atmosférica (no considerada en este trabajo).

La ecuación (7) corresponde a las condiciones de borde sobre las superficies interiores, siendo A_f el factor de absorción (para la frecuencia f) el cual puede adoptar diferentes expresiones a fin de modelar cada superficie interior con el rango completo de posibles coeficientes de absorción. En este trabajo, se utiliza un factor de absorción modificado (Jing and Xiang, 2008), el cual se adapta adecuadamente a partir de los valores de coeficientes de absorción utilizados.

A partir de la solución numérica estacionaria de $u_f(\mathbf{r})$, el nivel de sonoridad $G(\mathbf{r})$ generado por una fuente puntual omnidireccional en cada punto receptor \mathbf{r} y para cada frecuencia f queda formulado de la siguiente manera (Valeau, 2006):

$$G_f(\mathbf{r}) = 31 + 10 \log_{10} \left\{ \rho c \left[w_f / (4\pi r^2) + u_f(\mathbf{r}) c \right] / P_{ref}^2 \right\}, \text{ dB} \quad (8)$$

donde r expresa la distancia entre la fuente sonora y el receptor, ρ la densidad del aire y $P_{ref}^2 = 2 \times 10^{-5}$ Pa.

3.2 Modelo de difusión acústico simplificado (MDAS)

El modelo simplificado de difusión acústica se obtiene a partir del enfoque anterior mediante la aplicación de un método tipo Kantorovich de reducción de ecuaciones diferenciales. Esta metodología presenta la ventaja de que sólo parte de la solución es escogida "a priori" mientras que el resto de la misma es determinada de acuerdo con el carácter del problema (Kantorovich and Krylov, 1964; Cortínez and Laura, 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 $P(x, y)$ y la otra

considerando la variación en altura $F(z)$. De acuerdo a lo expresado, se tiene:

$$u(\mathbf{r}) = P(x, y) \times F(z) \quad (9)$$

donde la función P 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 $F(z) = 1 + a_1z + a_2z^2$. La idea de este enfoque es que la distribución vertical de la energía reverberante resulta en general más simple que la variación en el plano. Los coeficientes del polinomio se obtienen a partir de las condiciones de borde aproximadamente definidas en los dos planos extremos (piso y techo) mediante la siguiente expresión:

$$D \frac{dF(z)}{dz} = \pm AF(z) \quad (10)$$

Sustituyendo la expresión (9) en la ecuación (6) se obtiene la función residual $\varepsilon(\mathbf{r}, u)$. Haciendo tal función ortogonal con respecto a F se consigue la siguiente expresión:

$$\int_0^H D F^2 dz \nabla_p^2 P + \int_0^H D \left(\frac{d^2 F}{dz^2} \times F \right) dz P - \int_0^H \sigma F^2 dz P + \int_0^H q F dz = 0 \quad (11)$$

donde H es la altura de recinto y el término ∇_p representa el laplaciano en el plano. A partir de la expresión (11) se efectúan las siguientes definiciones:

$$D_{z1} = \int_0^H D F(z)^2 dz \quad (12)$$

$$D_{z2} = \int_0^H D \left(\frac{d^2 F(z)}{dz^2} \times F(z) \right) dz \quad (13)$$

$$\sigma_z = \int_0^H \sigma F(z)^2 dz \quad (14)$$

$$q_z = \int_0^H q F(z) dz \quad (15)$$

$$A_z = \int_0^H AF(z)^2 dz. \quad (16)$$

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

$$D_{z1} \nabla_p^2 P + (D_{z2} - \sigma_z) P + q_z = 0 \quad \text{en } \Omega$$

$$D \frac{\partial P}{\partial n} = -A_z c P D_{z1} \quad \text{en } p \quad (17)$$

donde Ω representa el dominio en el plano y p es el perímetro. Finalmente, el nivel de sonoridad se obtiene de la misma manera que en el MDA, a partir de la expresión (8).

4 TÉCNICA DE OPTIMIZACIÓN: MÉTODO DE SIMULATED ANNEALING

Es una técnica heurística de optimización combinatoria basada en la generación aleatoria de soluciones factibles cuya principal característica es la de evitar convergencia local en problemas de gran escala. El concepto general de este enfoque fue desarrollado inicialmente en la década de 80 (Kirkpatrick et al., 1983). El algoritmo comienza definiendo una solución inicial X_0 dentro de la región factible del problema y genera sucesivamente, a partir de ella y en un dominio reducido y fijo $N(X)$ de la región factible, nuevas soluciones X' que son aceptadas como actuales de acuerdo a un cierto criterio probabilístico. A medida que el algoritmo avanza se va disminuyendo un parámetro de control definido como temperatura (T) de manera tal de acotar la probabilidad de aceptar soluciones factibles que no produzcan una mejora en la función objetivo.

La función que determina y controla el descenso de la temperatura (parámetro de convergencia), 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 controlar la convergencia cuyo principal objetivo es logra reducir la temperatura más rápidamente al inicio del algoritmo, evitando aceptar en un comienzo la mayoría de las soluciones factibles y en consecuencia reducir el elevado costo inicial. El esquema general del algoritmo ha sido presentado por los autores en otro trabajo (Cortínez y Sequeira, 2009).

5 EJEMPLO NUMÉRICO

A los efectos de implementar el correspondiente enfoque de diseño óptimo, se considera una sala de concierto cuya configuración inicial se presenta en la Figura 1. El área del escenario permanece fija y se ubica 1 m por encima de la zona de audiencia. Durante el proceso iterativo, la variación correspondiente a las dimensiones del recinto en la zona de la audiencia permite considerar distintas formas geométricas, desde paralelepíedros hasta configuraciones tipo “abanico”. Se consideraron 12 puntos receptores en la zona de la audiencia con una altura de 1.1 m ubicados a distintas distancias de la fuente para evaluar la función objetivo. La fuente puntual omnidireccional se localiza centrada sobre el escenario a una altura de 1.2 m y 3 m alejada de la línea frontal del mismo.

El material utilizado sobre el piso del escenario y la audiencia se modelan con una absorción correspondiente a “piso de parquet” y “sillas vacías tapizadas con alta absorción”, respectivamente. Para las superficies restantes (variables de diseño) se consideraron distintos coeficientes de absorción en función de materiales comúnmente utilizados en salas de concierto. Las reflexiones sobre las superficies se consideraron completamente difusas.

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 MDAS a partir del método de elementos finitos. Para esta tarea se hace uso del software comercial Flex-PDE®.

En la Figura 2 se muestran los valores estimados de G para la configuración inicial expuesta en la Figura 1, y en la Figura 3 se presentan los valores de G obtenidos para la sala una vez efectuado el proceso de optimización. Se ha procurado que ambas configuraciones tengan el mismo volumen. En ambos casos, se comparan los resultados con los calculados utilizando la formulación de Barron (Barron and Lee, 1988) y con el método de ray tracing implementado en el software de simulación CATT-Acoustic® v8.0.

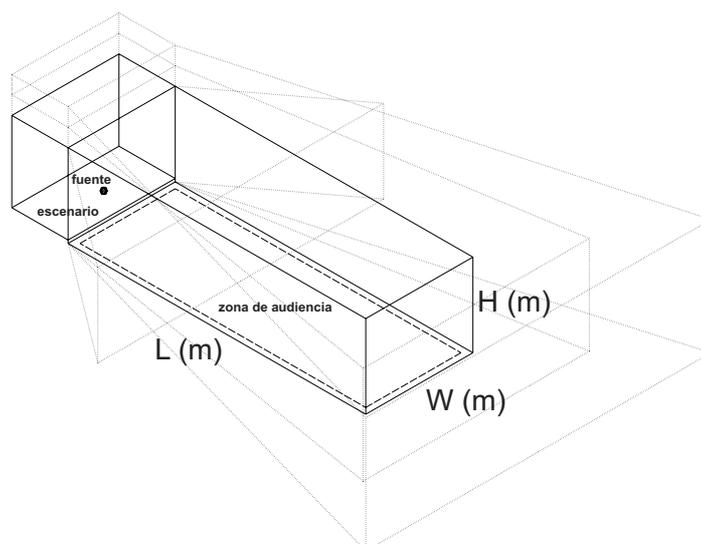


Figura 1: Configuración inicial de la sala para la optimización. El rango de movimientos de cada dimensión (L, W y H) es de ± 1 m con respecto a la situación inicial.

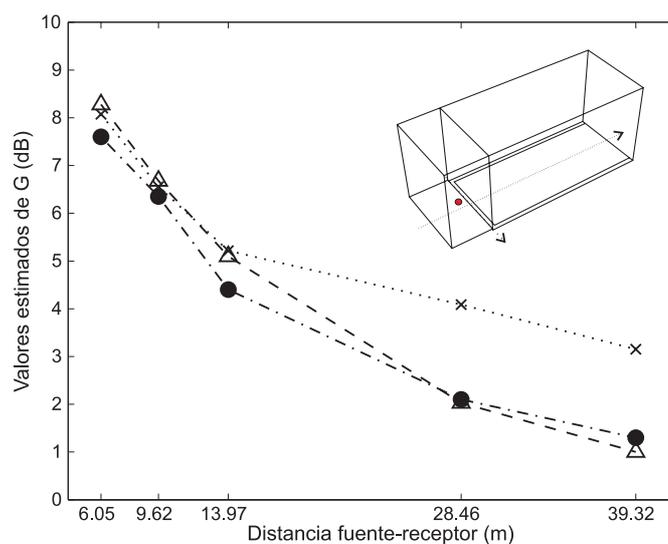


Figura 2: Valores estimados de G para una configuración inicial de la sala: Ray tracing (—●—); Modelo simplificado de difusión (—Δ—) y Teoría de Barron (—×—).

Es posible apreciar en ambas figuras que los resultados obtenidos mediante el método de ray tracing arrojan una diferencia muy pequeña (con un error máximo de 0.5 dB) con respecto a los resultados determinados mediante el método propuesto MDAS. Asimismo, es importante mencionar que el modelo acústico de difusión completo (MDA) brinda resultados prácticamente idénticos a los del MDAS, por tal razón no son reportados. En cambio es posible observar que la teoría de Barron es más imprecisa, arrojando valores de G con errores que pueden alcanzar hasta los 2 dB. En el recinto optimizado, es posible observar que la distribución de G resulta más aplanada mostrando una diferencia entre valores extremos del orden de los 4 dB, en cambio la sala de referencia presenta valores más altos, alcanzando los

6 dB. El diseño optimizado permite obtener una distribución de sonoridad cercana a la óptima a partir de cierta distancia de la fuente.

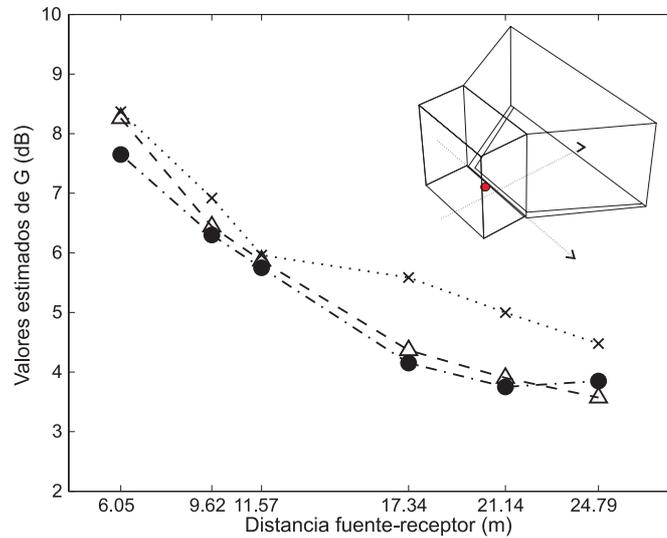


Figura 3: Valores estimados de G luego de implementar el diseño óptimo: Ray tracing (—●—); Modelo simplificado de difusión (—△—) y Teoría de Barron (—×—).

En la Tabla I se muestra la comparación entre las variables de diseño en la situación de referencia y para el recinto optimizado. Se compara además, la diferencia media cuadrática con respecto al valor óptimo de G (4.75 dB). Como puede verse tal indicador es 1 dB más bajo en la situación optimizada.

Variables	Situación inicial	Situación óptima
L (m)	37.8	19
W (m)	18	40
H (m)	20	19
α_{esc} (500 Hz/1000 Hz)	0.09/0.06	0.09/0.06
α_{aud} (500 Hz/1000 Hz)	0.03/0.04	0.03/0.04
α_{techo} (500 Hz/1000 Hz)	0.44/0.80	0.44/0.80
RT (seg)	2.24	2.04
$\sqrt{OF/N}$ (dB)	2.75	1.7

Tabla 1: Valores de las variables para la situación inicial y para el diseño óptimo.

6 CONCLUSIONES

Se formuló, mediante un enfoque de optimización, un método para diseñar acústicamente una sala de concierto para música sinfónica, a partir de considerar valores óptimos recomendados del tiempo de reverberación global RT y de la sonoridad G en distintos puntos receptores de la zona de audiencia.

Para ello, se propuso una formulación simplificada del modelo de difusión acústica MDA en conjunto con el método heurístico de “simulated annealing”. Asimismo, se utilizó la técnica de trazado de rayos implementado mediante el software CATT-Acoustic a los efectos

de comparar el modelo acústico de difusión. Tal comparación demostró que los valores obtenidos mediante el enfoque propuesto resultan adecuados. Por otra parte, el tiempo de cómputo empleado durante el proceso de diseño fue de 15 minutos considerando 1200 iteraciones. Esto indica la buena eficiencia del enfoque propuesto.

Si bien el enfoque propuesto, a partir de los indicadores sonoros utilizados, proporciona un método apropiado para diseñar acústicamente la geometría de salas de concierto, cabe mencionar que existen otros indicadores que son necesarios considerar para caracterizar en forma más acabada la acústica en estos tipos de recintos. En particular, aquellos indicadores que presentan una gran dependencia de la energía sonora debida a las reflexiones tempranas, como por ejemplo la claridad musical (C), eficiencia lateral (LF), tiempo de retardo inicial de sonido (Δt_1) y correlación cruzada interaural (IACC). En tal sentido, como trabajo a futuro, los autores evaluarán la precisión del modelo de difusión para caracterizar la parte temprana del campo sonoro reverberante y otros enfoques combinados a los efectos de obtener una técnica de predicción adecuada que contemple la multiplicidad de factores determinantes para la calidad final del recinto. Los resultados del presente trabajo constituyen un primer paso hacia el diseño óptimo de salas de concierto.

Agradecimientos. Este trabajo es parte del proyecto “Modelos Matemáticos en Ingeniería Ambiental: Problemas Directos e Inversos” (Código: 25/B027, 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

- Barron M., and Lee L-J. Energy relations in concert auditoriums. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84:618–628, 1988.
- Beranek L. *Concert Halls and Opera Houses*, Springer Verlag, New York, 2004.
- Beranek L. The sound strength parameter G and its importance in evaluation and planning the acoustics of halls for music. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129(5):3020–3026, 2011.
- 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.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.H., y Sequeira M.E. Un enfoque híbrido para el rediseño acústico óptimo de recintos industriales. *Mecánica Computacional*, Vol. XXVIII, 39-61, 2009.
- Cortínez V.H., y Sequeira M.E. Identificación de condiciones acústicas en recintos industriales. *Mecánica Computacional*, Vol. XXIX, 2155-2172, 2010.
- Escolano J., Navarro J.M., López J.J. On the limitation of a diffusion equation model for acoustic predictions of rooms with homogeneous dimensions. *Journal of the Acoustical*

- Society of America*, 128(4):1586–1589, 2010.
- Isbert A.C. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, 1ra ed. UPC, 1998.
- Jing Y., and Xiang N. On boundary conditions for the diffusion equation in room-acoustic prediction: Theory, simulations and experiments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(1):145–153, 2008.
- Kantorovich L.V., and Krylov V.I. *Approximate Methods of Higher Analysis*. 3rd ed. New York: Interscience Publishers, Groningen: Noordhoff; 1964.
- Kirkpatrick S., Gelatt C., and Vecchi M. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 20:671-680, 1983.
- Klosak A.K., and Gade A.C. Relationship between room shape and acoustics of rectangular concert halls. *Euronosie*, Paris, 2008.
- Kuttruff H. *Room Acoustics*, 4th ed. Spon Press, New York, 2000.
- Monks M., Mok Oh B., and Dorsey J. Audiooptimization: Goal-Based Acoustic Design. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20(3):76-91, 2000, doi:10.1109/38.844375.
- Nannariello J., and Fricke F.R. The use of neural network analysis to predict the acoustic performance of large rooms Part I. Predictions of the parameter G utilizing numerical simulations. *Journal of Applied Acoustics*, 62:917–950, 2001.
- 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.
- Rindel J.H. The Use of Computer Modeling in Room Acoustics. *Journal of Vibroengineering*, 3(4):219-224, 2000.
- Sequeira M.E., y Cortínez, V.H. Un modelo de difusión acústica para recintos: comparación con el método de rayos. *Mecánica Computacional*, Vol. XXVIII, 163-179, 2009.
- 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.
- Vidal M., Un procedimiento heurístico para un problema de asignación cuadrática. Tesis de Magister en Matemática, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, 2003.