

Optimización de Coeficientes de Absorción para Simulación Numérica Acústica

Optimization of Absorption Coefficients for Numerical Acoustic Simulation

Gandhi Mora Guevara, José Lucio Naranjo, Luis Bravo Moncayo

Resumen—El siguiente trabajo presenta una metodología para optimizar los coeficientes de absorción, considerados convencionalmente como los principales parámetros de entrada de los simuladores acústicos de salas. En primer lugar se hace una presentación de las principales características del simulador acústico utilizado. Después, se detalla el procedimiento que se basa en un enfoque de ascenso de colinas modificado. Este realiza la optimización del valor de los coeficientes en un procedimiento iterativo, que incluye el cálculo de los parámetros de calidad acústica (PCAs) con los resultados de una simulación acústica de una sala real. Los PCAs provenientes de cada simulación son comparados con mediciones experimentales realizadas en la sala, utilizadas como referencia para los ajustes iterativos. Finalmente, los resultados de la última iteración evidencian una reducción substancial del error, mostrando diferencias del 5.83 % con los PCAs medidos en la sala real.

Palabras clave—optimización de coeficientes de absorción, ascenso de colinas modificado, simulación computacional acústica.

Abstract—The following work presents a methodology to optimize the absorption coefficients, conventionally considered as the main input parameters of room acoustical simulators. In the first place a presentation of the main characteristics of the acoustic simulator is made. Next, the procedure that is based on a modified “hill-climbing” approach is detailed. It performs the optimization of the coefficients value in an iterative procedure, which includes the calculation of the acoustic quality parameters (AQPs) with the results of an acoustic simulation of a real room. The AQPs from each simulation are compared with experimental measurements performed in the room, used as a reference for iterative adjustments. Finally, the results of the last iteration show a substantial reduction of the error, showing differences of 5.83 % with the AQPs measured in the real room.

Index Terms—Optimization of absorption coefficients, modified “hill-climbing”, acoustic computational simulation).

I. INTRODUCCIÓN

Los recientes avances relacionados con las capacidades computacionales de procesamiento y almacenamiento han dado pie a la aparición de nuevas y potentes herramientas

de simulación. Entre estas, los modelos computacionales de propagación de la onda sonora se han convertido en un importante apoyo para acústicos y arquitectos, permitiendo el cálculo de las propiedades sonoras de toda clase de salas, algunas aún en planos, con un adecuado grado de confiabilidad [1].

Las aplicaciones más recientes, a más de simular fenómenos acústicos como reflexión, difusión, atenuación, etc., destacan por permitir la aurilización de ambientes, i.e. la producción de un estímulo sonoro que es capaz de recrear la sensación de inmersión acústica dentro del ambiente simulado [2]. No obstante, las validaciones de precisión para este tipo de aplicaciones no pueden basarse únicamente en impresiones subjetivas de los oyentes. En ese sentido, la norma ISO3382 [3] establece una serie de parámetros de calidad acústica (PCA), tales como T_{30} (tiempo de reverberación), EDT (tiempo de decaimiento temprano), C_{50} (factor de claridad a 50 ms.), D_{80} (definición a 80 ms.), T_s (tiempo central), etc., los cuales pueden ser calculados a partir de mediciones experimentales (para obtener datos de referencia) y también de resultados generados por el simulador (los datos a ser verificados).

Como todo modelo predictivo, los datos de entrada son transformados en variables de salida, las cuales deben guardar una relación coherente con las mediciones experimentales. A pesar de que las técnicas algorítmicas para simulación computacional de acústica de salas (trazado de rayos [4], imágenes virtuales [5], trazado de conos [6], camino libre [2], transición de energía [7], etc.) cuentan con una amplia aceptación [2], [8], estas son naturalmente dependientes de la calidad de sus datos de entrada.

En otras palabras, asumiendo que se cuenta con procedimientos algorítmicos correctamente implementados, el problema de la precisión de los simuladores computacionales acústicos estaría directamente relacionado con los siguientes aspectos: la adecuada representación de la geometría de las superficies de contorno, las propiedades acústicas (coeficientes de absorción por banda de frecuencia) de los materiales y factores ambientales tales como presión atmosférica, humedad y temperatura del recinto en cuestión.

La calidad de la mayoría de los aspectos antes mencionados, puede ser garantizada sin mayores complicaciones con un adecuado levantamiento de información relacionada al lugar donde se pretenda llevar a cabo una validación del simulador. Sin embargo, esto no puede ser aplicado en el caso de los

Article history:

Received 16 February 2017

Accepted 11 May 2017

G. Mora fue estudiante de ingeniería del Departamento de Informática y Ciencias de la Computación de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

J. Lucio esta con la Escuela Politécnica Nacional y L. Bravo esta con la Universidad de las Américas.

coeficientes de absorción de cada uno de los materiales, ya que las técnicas para la obtención de dicha información no son de fácil acceso por requerir laboratorios y equipamientos especializados [9]. En ese sentido, las simulaciones toman los coeficientes de absorción que se encuentran en la literatura [10]–[12].

Lo anterior presenta un inconveniente debido a que no es posible afirmar con seguridad que los materiales presentes en la sala son los mismos descritos en la literatura. Incluso en el caso que exista una coincidencia, los materiales de la sala pueden presentar propiedades de absorción acústica diferentes debido a montaje incorrecto, superficies diferentes, desgaste natural por la edad, entre otras [13].

En ese sentido, una alternativa válida es modificar iterativamente los coeficientes tomados de la literatura, de tal forma que los resultados de simulación generen PCAs que se vayan aproximando a aquellos calculados con mediciones experimentales tomadas en la sala real. Estudios recientes plantean el uso de complejos procesos de optimización evolutivos [9], [13].

El presente trabajo es un abordaje de ascenso de colinas modificado, que introduce una implementación más sencilla, basada únicamente en los parámetros T_{30} y EDT , alcanzando desvíos de aproximadamente 5.83 % entre los PCAs medidos y simulados.

A continuación se describe como está organizado este trabajo. En la Sec. II se presentan las principales características del simulador acústico utilizado, explicando el funcionamiento de los modelos que gobiernan la geometría del recinto, fuentes sonoras y receptores acústicos. También se topan asuntos relacionados con el algoritmo híbrido de propagación acústica y los principales resultados que entrega el simulador. En la Sec. III se detalla el funcionamiento del procedimiento de optimización de ascenso de colinas modificado y los datos referenciales para el ajuste. A continuación, en la Sec. IV y V se presentan y se discuten los resultados alcanzados en términos de los valores finales de los parámetros optimizados y de los PCAs (T_{30} y EDT) calculados en la última iteración del proceso.

Finalmente, las conclusiones son presentadas en la Sec. VI.

II. CONSIDERACIONES TEÓRICAS IMPORTANTES

Para garantizar el procedimiento de optimización es necesario tener certeza que los modelos y algoritmos que conforman al simulador acústico funcionen correctamente. En ese sentido, la presente sección hace una revisión de los principios físicos y geométricos que gobiernan los modelos y procedimientos programados en la aplicación computacional de simulación de propagación de la onda acústica.

II-A. Representación de la geometría y superficies de contorno de la sala

La representación de las superficies de contorno y de la geometría de la sala dentro del programa funciona gracias a una estructura de datos que almacena información de varios planos triangulares. Los triángulos, que deben ser diseñados con la ayuda de herramientas CAD a partir de los planos arquitectónicos de la sala real, están posicionados de forma que

configuren un espacio tridimensional cerrado. Cabe señalar que cada uno de los vectores normales a los planos deben estar orientados al interior de la sala, el cual es un requerimiento del algoritmo de reflexión especular. Cada uno de estos elementos está relacionado a un material acústico que posee coeficientes de absorción α y difusión δ en cada banda de octava, los cuales pueden encontrarse en diversas bases de datos [10]–[12].

II-B. Fuentes sonoras y representación de los frentes de onda

Siguiendo los principios de la acústica geométrica [8], la representación de los frentes de onda es abordada mediante la utilización de *rayos acústicos*. Esto es, estructuras de datos que contienen información de una fracción de la onda acústica, con datos de la dirección, tiempo de propagación y también del espectro energético por banda de octava (125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz).

Llevando en consideración que los ensayos experimentales en la sala real se realizaron utilizando una fuente dodecaédrica (con propagación omnidireccional), la simulación computacional busca simular una propagación esférica utilizando 10^5 rayos partiendo del punto central de la fuente sonora, con una distribución direccional que busca la máxima homogeneidad posible basada en la subdivisión geodésica del icosaedro como lo muestra la Fig. 1 [14]. Cada vector director es determinado a partir del punto central de la fuente y el baricentro de cada triángulo geodésico. La ecuación empleada para el cálculo del número de rayos, N_R , viene expresada como sigue:

$$N_R = 2 + 10n^2, \quad (1)$$

donde n son las subdivisiones triangulares del icosaedro.

La potencia acústica de cada uno de los rayos, W_r , producidos por la fuente de sonido está dado por

$$W_r = \frac{W_f}{N_R}, \quad (2)$$

donde W_f es la potencia acústica de la fuente de sonido.

Dado que la respuesta impulsiva puede describir todas las características frecuenciales de un (recinto o sala) sistema lineal invariable en el tiempo [2], [8], [15], la simulación numérica debe procurar simular la emisión de una señal aproximada a un Delta de Dirac desde la fuente sonora. Para esto, la potencia acústica de cada rayo se divide en proporciones iguales para cada una de las bandas de octava consideradas, representando de esta forma un espectro de potencia homogéneo en todas las banda de frecuencias, tal como muestra la Fig. 2.

II-C. Modelado de la propagación de la onda acústica

Cada vez que ocurre una reflexión sobre una superficie de la sala, se producen pérdidas energéticas por banda de octava en el rayo acústico, las cuales están directamente relacionadas a los coeficientes de absorción α y difusión δ del material asignado al triángulo (ver Fig. 3).

La fracción de la energía incidente, E , que será absorbida por superficie alcanzada está dada por $E\alpha$. Otra fracción, $E(1 - \alpha)\delta$, será reflejada de forma difusa (usando un abordaje de transición de energía [16]). $E(1 - \alpha)(1 - \delta)$ es el valor

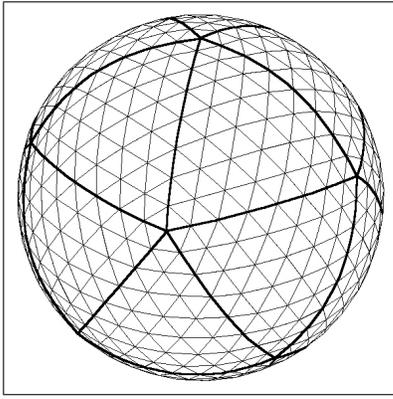


Figura 1. Subdivisión geodésica del icosaedro

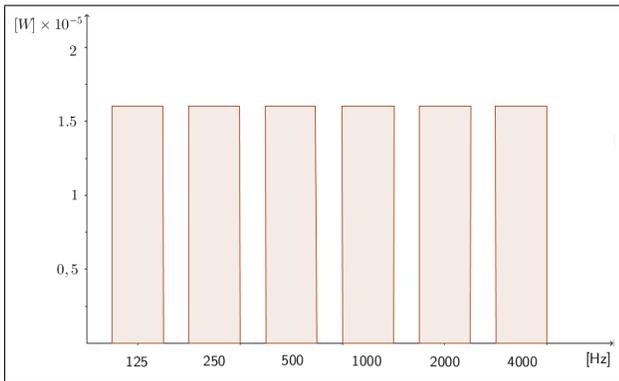


Figura 2. Espectro energético por bandas de octava en el punto de partida

de la energía residual que se refleja de forma especular, en concordancia con la ley de Snell (controlada por una rutina de trazado de rayos [4]).

La determinación de cual superficie triangular será incidida por un rayo requiere de n_t verificaciones, donde n_t es el número de triángulos de la sala. El procedimiento siempre tendrá que verificar todos los triángulos, ya que puede existir más de uno en ruta de intersección y obviamente se debe escoger al triángulo que se encuentre más próximo al punto de partida del rayo. Este tiempo computacional se repetirá por cada uno de los N_R rayos emitidos. El procedimiento se torna más complejo cuando se toma en consideración que cada

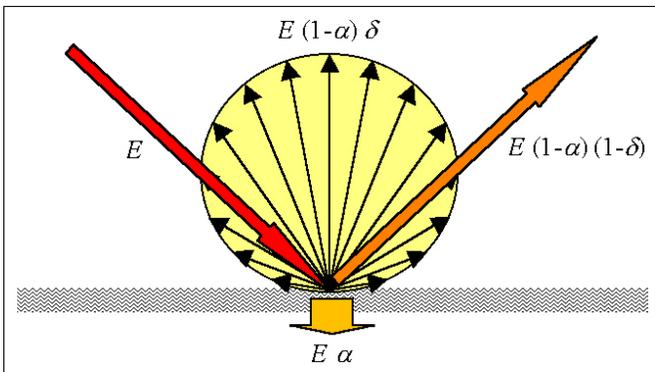


Figura 3. Reflexión acústica

rayo se reflejará varias veces por las superficies de contorno. Asumiendo que cada rayo se refleje en promedio n_x veces, el tiempo computacional para el trazado de rayos será de $O(n_t N_R n_x)$.

Por tal motivo, se tomó un procedimiento de renderización gráfica 3D [17], el cual encierra el ambiente en un gran cubo y agrupa a los triángulos de acuerdo a su posición dentro del cubo (identificada con 8 subdivisiones iguales del cubo original). Si algún triángulo no está completamente encerrado por alguno de los 8 cubos pequeños, el triángulo es cortado por un procedimiento geométrico de intersección de planos y (de ser el caso) sus componentes resultantes son nuevamente triangulados. Cada subcubo puede nuevamente dividirse en 8 partes, de forma que la definición de la posición de los triángulos se vuelva cada vez más precisa. Al final, con tres subdivisiones del cubo original se obtiene un esquema de premapeo de los triángulos, asociándose de esta manera a un árbol octal de búsqueda (ver Fig. 4) y permitiendo una reducción del tiempo computacional a aproximadamente $O(8 \log_8(n_t) N_R n_x)$.

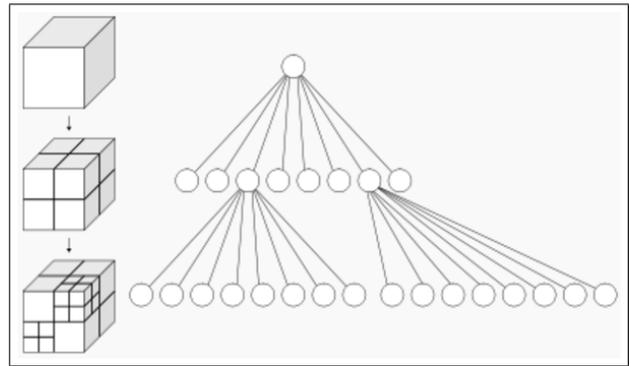


Figura 4. Árbol octal asociado a una subdivisión cúbica del espacio simulado.

II-D. Receptores

Eventualmente, varios rayos acústicos alcanzarán al receptor (ver Fig. 5) portando información sobre la energía residual que aún posean (ver Fig. 6), la dirección de incidencia y el tiempo de propagación.

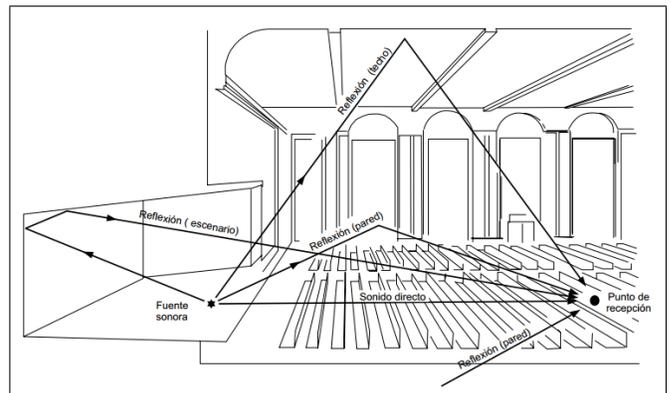


Figura 5. Rayos acústicos que parten de la fuente sonora y alcanzando en su trayectoria a un receptor acústico [18]

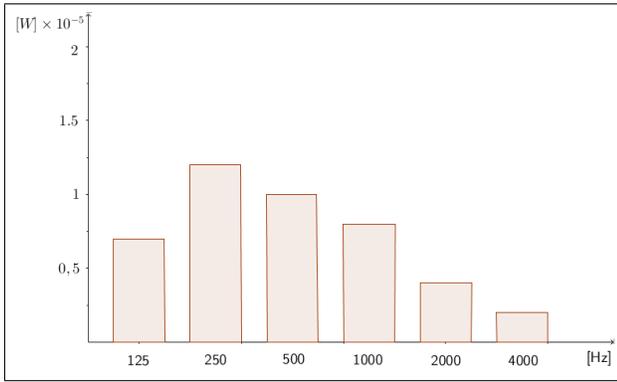


Figura 6. Espectro sonoro residual por banda de octava de un rayo acústico al momento de incidir sobre un receptor

La Figura 7 ilustra la estructura típica del histograma de presión cuadrática de un receptor posicionado en un punto arbitrario de una sala excitada por un impulso. Se puede observar el sonido directo, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías, constituyendo estas últimas la denominada cola reverberante de la sala.

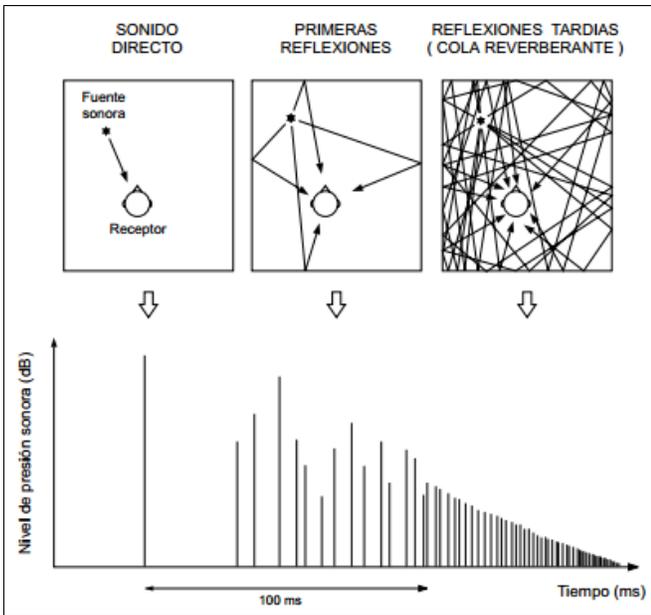


Figura 7. Histograma energético acústico asociado a: a) sonido directo; b) primeras reflexiones y c) cola reverberante [18]

No existe un criterio preciso para la definición de la frontera exacta entre las primeras reflexiones y la cola reverberante. Sin embargo, esta puede estar entre los 50 – 80 ms. Las primeras reflexiones contribuyen para reforzar el sonido directo, aumentando su audibilidad, facilitando la inteligibilidad de la palabra y la claridad musical [19]. Las reflexiones tardías son responsables por la sensación de reverberación propiamente dicha y de envolvimiento del oyente [20].

En este punto es importante considerar la medida de energía transportada en una onda acústica. Dicha medida es la intensidad sonora y esta dada por

$$I = \frac{W_f Q}{A}, \quad (3)$$

donde Q es el factor de directividad de la fuente ($Q = 1$ para fuentes omnidireccionales), A es el área de influencia (en el caso de propagación esférica, $A = 4\pi r_f^2$, donde r_f es la distancia entre el centro de la fuente y el frente de onda).

La intensidad también puede ser expresada en términos de presión sonora y velocidad de partícula, de la siguiente forma:

$$I = pv, \quad (4)$$

donde p es la presión sonora, v es la velocidad de partícula.

Ya que se está tratando con un simulador basado en los principios de acústica geométrica [8], se asume que todos los frentes de onda son ondas planas. Esto quiere decir que la presión sonora y el componente longitudinal de la velocidad de partícula están relacionados por:

$$p = v\rho_0 c, \quad (5)$$

donde ρ_0 es la masa específica del aire y c es la velocidad del sonido. Esto permite expresar la Ec. 4 como

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c}. \quad (6)$$

Igualando las Ecs. 3 y 6 y despejando la presión cuadrática obtenemos la Eq. 7, que permite encontrar la presión cuadrática en función de la potencia de la fuente, masa específica del aire ρ_0 , la velocidad del sonido c y el área A .

$$p^2 = \frac{W_f Q \rho_0 c}{A}. \quad (7)$$

Esta expresión es ajustada para la discretización computacional de los frentes de onda (rayos acústicos) quedando de la siguiente manera

$$p_i^2 = \frac{W_{ri} \rho_0 c}{A_R}, \quad (8)$$

donde p_i^2 es el aporte de presión cuadrática del i -ésimo rayo, W_{ri} es la potencia acústica residual del rayo en cuestión al momento de incidir sobre el receptor y A_R es el área de incidencia del receptor acústico (micrófono).

Una vez definida la expresión matemática, se debe considerar aspectos geométricos y físicos de la recepción. En ese sentido, se sabe que en el mundo físico varios frentes de onda acústicos incidirán sobre la superficie de los micrófonos o receptores, la cual es pequeña con respecto al resto de la sala. Por otro lado, en el modelo computacional, los receptores tienen una superficie de mayores proporciones para facilitar la eventual incidencia de los rayos acústicos, los cuales se dispersan a medida que se alejan de la fuente sonora. El algoritmo de recepción usado para este trabajo considera una placa circular. Este disco de recepción gira alrededor de su centro, de manera que el rayo acústico es siempre ortogonal a la misma, como puede observarse en la Fig. 8.

Para este caso, la intensidad en el receptor, I_R , en un instante dado t es:

$$I_R = \sum_{i=0}^l \frac{W_{ri}}{\pi r_{dr}^2}, \quad (9)$$

donde l es la cantidad de rayos incidentes en el instante t , W_{ri} es la potencia del i -ésimo rayo, πr_{dr}^2 es el área del disco de recepción con radio geométrico r_{dr} .

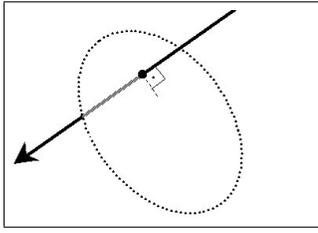


Figura 8. Rayo acústico ortogonal al disco de recepción que rota con eje en su propio centro.

II-E. Curva de Decaimiento Energético

La curva de decaimiento energético (*EDC*, del inglés *Energy Decay Curve*) representa la disminución de la energía sonora en una sala. Esta se obtiene mediante un promedio de varios experimentos de medición. Cada uno de estos consiste en emitir un ruido blanco en régimen permanente en una sala sin ruido de fondo hasta que el campo sonoro alcance una distribución espacio temporal estacionaria. Una vez en este estado, se apaga la fuente sonora y se registra el tiempo de decaimiento. La *EDC* se determina al promediar todos los experimentos de medición. En ese sentido, la *EDC* está representada por $\bar{e}(t, x)$, donde t es el tiempo, x es la posición del receptor y la barra indica que se trata del promedio energético de experimentos realizados.

Schroeder [21] demostró que la curva de decaimiento energético medio, para una posición del receptor, puede ser obtenida matemáticamente por la integración inversa de la respuesta impulsiva cuadrática de la sala, *QIR- Quadratic Impulse Response*, quedando de la siguiente manera

$$EDC_p(t) = \bar{e}(t, x) = C \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau, \quad (10)$$

donde C es una constante relacionada con la potencia de la fuente y $p^2(\tau)$ es una *QIR* de la sala, expresada como presión cuadrática. De ese modo, un número teóricamente infinito de ensayos de decaimiento a partir de la supresión de la fuente sonora puede ser substituido por un único test impulsivo de una sala [20]. Este descubrimiento es aprovechado por los simuladores acústicos, siendo para estos posible calcular la *EDC* ya que el resultado de la simulación numérica entrega la respuesta impulsiva cuadrática.

II-F. Tiempos de Reverberación y Decaimiento Inicial

La reverberación es un fenómeno sonoro que depende directamente de la geometría del recinto y de la capacidad absorbente acústica de los materiales de las superficies de contorno de la sala. Se produce por la reflexión de los distintos frentes de onda y produce una ligera permanencia del sonido una vez que la fuente original ha dejado de emitirlo. Por tal motivo, este fenómeno es uno de los primeros indicadores de una correcta o incorrecta simulación numérica, validando preliminarmente los coeficientes de absorción de los materiales de la sala, la geometría del recinto y hasta los algoritmos de simulación de la propagación de la onda.

El grado de absorción del sonido de un material cualquiera se representa mediante el coeficiente de absorción, α (anteriormente ilustrado en la Fig. 3). Se define como una razón

dada por

$$\alpha = \frac{E_a}{E}, \quad (11)$$

donde E_a es la energía absorbida por el material y E es la energía incidente sobre el mismo.

La absorción de un material, Abs , se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción, α , por su superficie, S . Como un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define la absorción total, Abs_t , como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, de la siguiente manera

$$Abs_t = \sum_{i=1}^s \alpha_i S_i, \quad (12)$$

donde s es el número de superficies.

Partiendo de esta expresión, es posible definir el coeficiente medio de absorción como

$$\bar{\alpha} = \frac{Abs_t}{S_t}, \quad (13)$$

donde S_t es la superficie total del recinto, la cual se obtiene al sumar la superficie de cada una de las superficies de contorno del ambiente considerado (paredes, techo y suelo).

Con estos elementos, es posible aplicar la fórmula de Sabine para estimar el tiempo de reverberación, TR . Esta fórmula proporciona una aproximación del tiempo en segundos en el cual un sonido decae 60 dB dentro de una sala. Esta es aceptada como referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo [22] y está dada por

$$TR = \frac{0,161V}{\bar{\alpha}S_t}, \quad (14)$$

donde V es el volumen de la sala. Es decir, cuanto mayor sea la absorción y la superficie de incidencia, menor será TR y cuanto mayor volumen tenga la sala, mayor será TR .

Según se observa, el TR calculado a cada frecuencia de interés mediante la fórmula de Sabine, no tiene en cuenta la ubicación de receptor, es decir, es único para cada recinto. Por otra parte, es preciso comentar que, a pesar de la utilización universal de esta fórmula, su validez se circunscribe al caso de recintos con las siguientes características [8], [18]:

- Decaimiento energético exponencial asociado a un campo sonoro perfectamente difuso.
- Geometría regular de la sala.
- Coeficiente de absorción medio inferior a 0,4.

Estas limitaciones resaltan la importancia de contar con *Parámetros de Calidad Acústica* (PCA) basados en una formulación matemática bien establecida. La norma 3, plantea tales parámetros formulados a partir de la respuesta impulsiva cuadrática (QIR), captada por cada receptor posicionado en un determinado punto de la sala. Algunos de estos PCAs se basan en la Curva de Decaimiento, como los dos siguientes:

II-F1. Tiempo de Decaimiento Inicial, EDT (Early Decay Time): M. Abad Sorbet [22] resalta la importancia psicoacústica que tiene el decaimiento inicial de la sala, a partir de experimentos subjetivos. El parámetro de calidad acústica que registra este decaimiento inicial es el *EDT*, el cual está definido como el tiempo correspondiente a los primeros 10 dB

de atenuación en la $\bar{e}(t, x)$, multiplicado por seis (en referencia a los 60 dB de Sabine).

II-F2. Tiempo de Reverberación T_{30} : A diferencia del TR obtenido con la fórmula de Sabine, este parámetro no es único para cada recinto. El T_{30} puede ser calculado a partir de la Curva de Decaimiento Energético, obtenida a su vez de la respuesta impulsiva cuadrática captada por un receptor. Este parámetro está definido como el tiempo de decaimiento de 60 dB. En mediciones, la norma ISO 3382 [3] establece que se debe tomar el decaimiento entre 5 dB y 35 dB. Ese resultado es multiplicado por dos, generando entonces el T_{30} .

En el caso en que exista una perfecta difusión sonora producida por una geometría regular de la sala y por una distribución homogénea y uniforme de los materiales utilizados como revestimientos, el decaimiento de la energía sonora seguirá una evolución exponencial, la cual se convertirá en una línea recta al pasar a escala semilogarítmica. En tal caso, el valor del EDT , T_{30} y TR coincidirán. Sin embargo, este es un caso ideal. En la práctica, como consecuencia de una falta de difusión perfecta, la curva de decaimiento energético puede presentar, en distintos puntos de la sala, una doble pendiente. Por lo que ambos valores diferirán su grado, como lo indica la Fig. 9.

Como la curva de decaimiento energético medio no es exactamente lineal, es muy común que el T_{30} y el EDT no coincidan. Es más, el EDT está más relacionado con la impresión subjetiva de viveza o reverberancia percibida. Por otro lado, el TR mide la reverberación real objetiva. Esto significa que, en todos aquellos puntos de una sala con un EDT significativamente menor que el TR , la sala resultará, a nivel subjetivo, más apagada [18]. Esto quiere decir que los puntos de la sala con valores de EDT menores presentan una mayor concentración de las reflexiones y en consecuencia, una mayor absorción respecto al resto de posiciones de la sala [22].

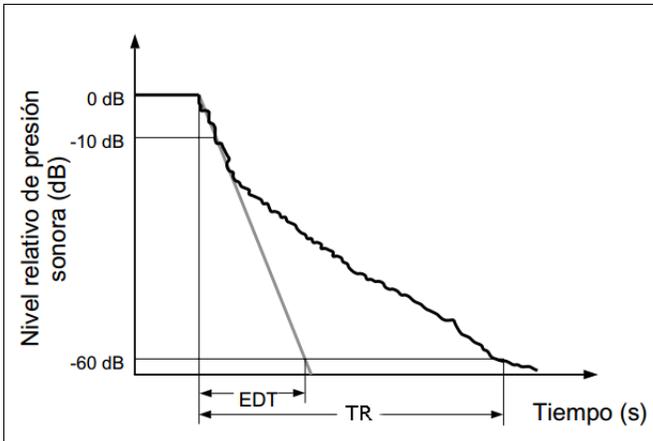


Figura 9. Comparación EDT y TR

III. METODOLOGÍA

Como en la mayoría de casos la sala en análisis que no poseerá las características habilitantes que requiere la ecuación 14, la corrección de los coeficientes de absorción se basa en un proceso de optimización formulado a partir de la reducción

simultánea del error buscando un punto de equilibrio entre dos parámetros de calidad acústica (calculados con datos modelados y medidos). Los parámetros reales fueron calculados con datos captados por cada uno de los receptores distribuidos en la sala en cuestión.

III-A. Escenario experimental y configuración de la simulación computacional

El procedimiento de optimización toma como referencia mediciones experimentales realizadas por investigadores del Laboratorio de Instrumentación en Dinámica, Acústica y Vibraciones (LIDAV) de la Universidad del Estado de Rio de Janeiro (UERJ) en el Teatro del Colegio Anchieta, fundado el 12 de abril de 1886 en la ciudad de Nova Friburgo, Brasil (ver Fig. 10).



Figura 10. Interiores del Teatro Anchieta

Una fuente dodecaédrica (omnidireccional) fue ubicada en el centro del escenario mientras que seis micrófonos fueron colocados en diferentes posiciones del auditorio. Con esto se hizo el levantamiento de la respuesta impulsiva en cada uno de los seis receptores y se calcularon los siguientes PCAs: EDT , T_{30} , D_{50} , D_{80} , C_{50} , C_{80} y T_s .

Utilizando como base los planos arquitectónicos digitales, se realizó el levantamiento del modelo 3D en una herramienta CAD a un archivo DXF (Drawing eXchange Format), el cual fue posteriormente exportado al software de simulación.

El número de planos y el porcentaje de área que estos ocupan en el modelo 3D se detallan en la Tab. I.

Los coeficientes de absorción fueron escogidos en función de la similitud existente entre las superficies de contorno observadas en el teatro y la descripción de los materiales presente en la base de datos de coeficientes de absorción.

Una fuente sonora (también omnidireccional) y seis receptores fueron posicionados en el modelo computacional en las mismas ubicaciones utilizadas para las mediciones experimentales, como puede verse en la Fig. 12.

Los parámetros humedad, presión y temperatura ingresados al software de simulación corresponden a los promedios que se registran para la ciudad de Nova Friburgo en el período cuando se realizaron las mediciones experimentales. Estos

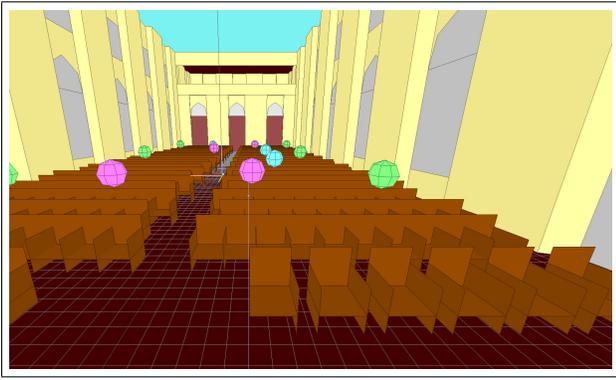


Figura 11. Simulación de los Interiores del Teatro Anchieta

Tabla I
NÚMERO DE PLANOS Y PORCENTAJE DE ÁREA DE LA SALA POR CADA MATERIAL

	Nro. Planos	% Área
Telas	24	11,52
Ventana	62	5,25
Tapicería	25	1,44
Telón	2	0,59
Sillas mdr.	1296	19,9
Puerta mdr.	3	0,53
Suelo mdr.	12	18,63
Pared	43	9,63
Manpostería	271	32,38

valores, junto con el área y volumen de la sala y la cantidad de triángulos para representar las superficies de contorno de la sala son presentados en la Tab. III.

Tabla II
COEFICIENTES DE ABSORCIÓN POR BANDA DE OCTAVA DE LOS MATERIALES DE LAS SUPERFICIES DE CONTORNO

Nombre	125	250	500	1000	2000	4000
Telas	0,03	0,12	0,15	0,27	0,37	0,42
Ventana	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Tapicería	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Telón	0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36
Sillas mdr.	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14
Puerta mdr.	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Suelo mdr.	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Pared	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Manpostería	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04

Tabla III
PARÁMETROS INICIALES DE SIMULACIÓN DEL TEATRO ANCHIETA

Temperatura = 25°C
Humedad = 75 %
Presión = 0,92 atm
Volumen = 5057,63 m ³
Área = 3453,82 m ²
No. triángulos = 4104
Velocidad del sonido = 346,40 m/s

III-B. Punto de Equilibrio (PE) y Ajuste de Coeficientes

Los resultados de la primera simulación computacional presentaron desvíos de aproximadamente 56 % en los parámetros EDT y T_{30} comparados con los datos medidos. Considerando que las rutinas computacionales para simulación de la propagación de la onda acústica ya han sido validadas con éxito [23], es posible asumir que la fuente de error en la representación del comportamiento reverberante de la sala real se centra principalmente en los coeficientes de absorción de los materiales de las superficies de contorno.

Dado que estos parámetros describen diferentes características del decaimiento de la sala, se partió de la premisa que una minimización simultánea y homogénea del error de modelado en ambos parámetros, en cada uno de los receptores, permitirá reducir la imprecisión del modelo computacional. En ese sentido, se determinó, en cada uno de los seis receptores, el error relativo por banda de frecuencia con los datos reales de EDT y T_{30} , de la manera convencional

$$Re_{T_{30}[b][r]} = \frac{T_{30}real_{[b][r]} - T_{30}sim_{[b][r]}}{T_{30}real_{[b][r]}}, \quad (15)$$

$$Re_{EDT[b][r]} = \frac{EDTreal_{[b][r]} - EDTsim_{[b][r]}}{EDTreal_{[b][r]}}, \quad (16)$$

donde, $Re_{T_{30}[b][r]}$ y $Re_{EDT[b][r]}$ son respectivamente el error relativo de los parámetros T_{30} y EDT modelados en la banda de octava b correspondiente al receptor r .

Los resultados modelados de un valor inferior a los medidos constituyen un indicador de que la sala modelada no es tan reverberante como la sala real. El inverso en este caso también es verdadero. Por lo tanto un aumento o disminución de los coeficientes de absorción, permitiría, respectivamente disminuir o aumentar la reverberación de la sala en una banda dada de frecuencia. La presencia de seis receptores obliga que este ajuste por banda de frecuencia sea realizado en función de la necesidad promediada de todos. En este punto, es importante recordar que la sala en cuestión no posee ninguna de las tres características ideales (ver Sección II-F) que permitiría que los PCAs, EDT y T_{30} , coincidan. Con esto en consideración, se pudo prever que un proceso de optimización o ajuste iterativo cerca del punto de convergencia, llegaría eventualmente a una circunstancia donde el aumento o disminución de la absorción de los materiales haría que los resultados mejoren para un parámetro, pero empeoren para el otro, tal y como lo ilustra la Fig. 13.

Este caso puede describirse como un problema de optimización de ascenso de colinas [24] pero sin oxígeno en la cima. Dado que no se puede alcanzar completamente el objetivo, la solución óptima consiste en llegar a un punto de equilibrio, i.e. el lugar más alto donde aún sea posible respirar.

El ímpetu de la corrección es otro punto importante a considerarse. Al inicio, es de esperarse que la corrección sea brusca, pero cerca del punto de convergencia, es necesario implementar un factor de atenuación para evitar oscilaciones. En ese sentido, se consideró un concepto similar al que cumple la temperatura en el método de ajuste de Temple Simulado [24]. Al inicio el factor de corrección será dado por el valor del

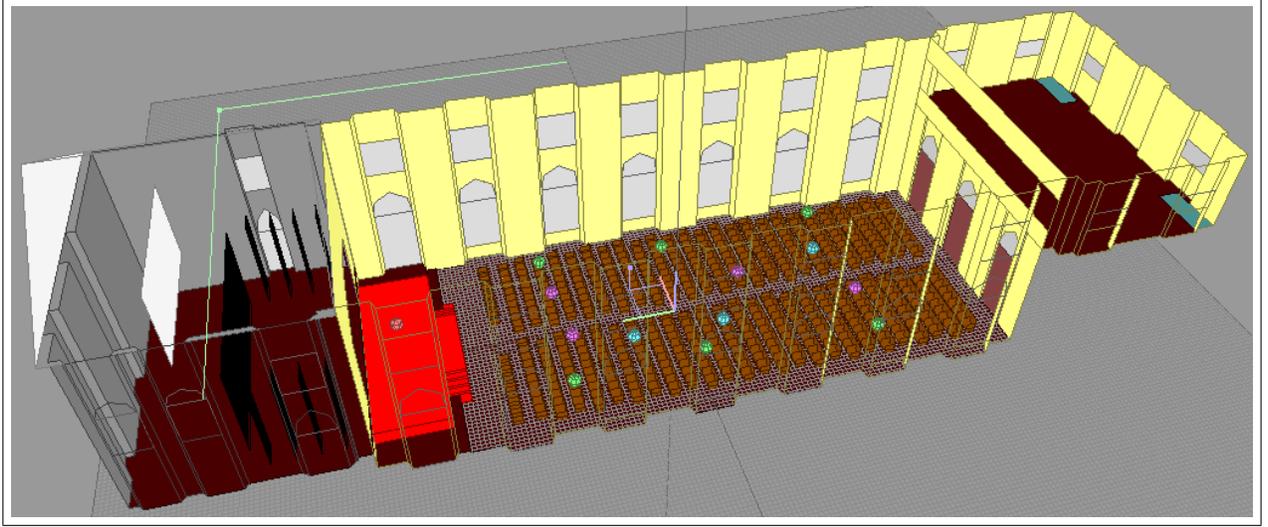


Figura 12. Posición de los receptores acústicos (en verde) y la fuente sonora (en rojo)

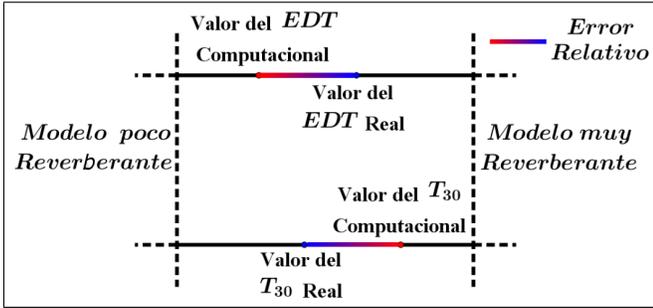


Figura 13. Error relativo en los parámetros EDT y T_{30} donde el extremo rojo representa el valor simulado y el extremo azul representa el valor real.

error relativo promedio en los parámetros de calidad acústica por banda de frecuencia dado por la Eq. 17.

$$\overline{Re}[b] = \frac{1}{o} \sum_{r=0}^o Re_{T_{30}[b][r]} + Re_{EDT[b][r]}, \quad (17)$$

donde, o es el número de receptores considerados. Con este valor, el coeficiente de absorción en la banda de octava b del material m en la k -ésima iteración estaría dado por

$$\alpha_k[m][b] = \alpha_{k-1}[m][b] + \alpha_{k-1}[m][b] \cdot \overline{Re}[b]. \quad (18)$$

A medida que el procedimiento avanza, el error relativo irá disminuyendo al igual que factor de corrección. Si se detecta alguna oscilación (es decir, la corrección de la k -ésima iteración produce el mismo resultado registrado en la iteración $k-2$), el valor de corrección se define como la diferencia entre los resultados de las iteraciones $k-2$ y $k-1$, como indica la Eq. 19

$$\alpha_k[m][b] = \alpha_{k-1}[m][b] + \frac{\alpha_{k-2}[m][b] - \alpha_{k-1}[m][b]}{2}. \quad (19)$$

El valor mínimo de corrección fue establecido en 0,01, ya que ningún material (en las bases de datos de coeficientes de absorción consultadas) registraba una tercera cifra decimal.

Cuando el valor de corrección en los coeficientes de absorción alcanza niveles inferiores a este valor mínimo en todas las bandas de frecuencia consideradas, se considera que el procedimiento iterativo alcanzó el punto de equilibrio.

Para monitorear la convergencia del procedimiento, la Eq. 20 permite identificar la variación del tiempo de reverberación T_R obtenido con la fórmula de Sabine. En las interacciones finales, la variación ΔT_R deberá tender a cero debido a que las variaciones de los coeficientes será sutil debido a la naturaleza del procedimiento,

$$\Delta T_{R_k} = T_{R_k} - T_{R_{k-1}}. \quad (20)$$

Finalmente, para conocer el porcentaje de cambio real P_{cr} que se produce en los coeficientes se debe considerar el área que cada material ocupa en la sala. Para esto se aplica una compensación de la siguiente manera

$$P_{cr} = P_c A_{mt}, \quad (21)$$

donde P_c es porcentaje de cambio en los coeficientes de absorción de una iteración con respecto a la anterior y A_{mt} es el porcentaje de área de la sala que ocupa cada material.

III-C. Parámetro de calidad acústico usados para validación

El proceso de validación final toma un PCA que no fue considerado para el ajuste de coeficientes. Este parámetro es el Tiempo central, T_s .

III-C1. Tiempo central T_s : El Tiempo central es usado para describir el balance entre la parte temprana y tardía de la respuesta impulsiva. Está definido por la Eq. 22 y permite conocer donde se encuentra el "centro de gravedad" de la función

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} tp^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt}. \quad (22)$$

En términos prácticos, el T_s sirve para medir el grado de nitidez del sonido. Un valor bajo corresponde a un sonido claro, mientras que un valor alto indica dominio del sonido tardío en consecuencia de la energía reverberante [25].

IV. RESULTADOS

Aplicando el procedimiento descrito en la Sección III-B, se alcanzaron resultados que evidencian una reducción de las diferencias existentes entre los parámetros calculados con datos medidos y con datos modelados computacionalmente. En las Tablas IV y V se muestra la evolución del error relativo promedio calculado con la Ec. 17 a lo largo de las nueve iteraciones que requirió el procedimiento para converger. Esta evolución muestra una minimización secuencial del error relativo promedio. Nótese que el ajuste realizado para la última iteración, no modificó los valores de los errores relativos encontrados en la penúltima iteración, evidenciándose la convergencia del procedimiento, con un error promedio de 0,00 %.

Tabla IV

ERRORES RELATIVOS PROMEDIO POR BANDA DE OCTAVA (bf) ENTRE LOS PCAS (EDT Y T_{30}) SIMULADOS Y MEDIDOS POR CADA ITERACIÓN (PARTE 1)

bf [Hz]	Ite. 0	Ite. 1	Ite. 2	Ite. 3	Ite. 4
125	0,21	-0,15	0,00	0,00	0,00
250	-0,40	0,45	-0,15	0,07	-0,06
500	-0,68	0,65	-0,07	0,04	0,04
1000	-0,73	0,38	0,10	0,01	0,01
2000	-0,68	0,12	0,12	0,11	0,10
4000	-0,60	-0,13	-0,08	-0,07	-0,06
Promedio	-0,48	0,22	-0,01	0,03	0,01

Tabla V

ERRORES RELATIVOS PROMEDIO POR BANDA DE OCTAVA (bf) ENTRE LOS PCAS (EDT Y T_{30}) SIMULADOS Y MEDIDOS POR CADA ITERACIÓN (PARTE 2)

bf [Hz]	Ite. 5	Ite. 6	Ite. 7	Ite. 8
125	0,00	0,00	0,00	0,00
250	-0,06	0,07	-0,06	-0,06
500	0,04	0,04	0,04	0,04
1000	0,01	0,01	0,01	0,01
2000	0,10	0,09	0,09	0,09
4000	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
Promedio	0,01	0,03	0,00	0,00

La Tabla VI ilustra el proceso de ajuste, tomando como ejemplo el material de tipo *Telas* (aplicado a 24 superficies de contorno de la sala). Los valores de los coeficientes de absorción iniciales (en la primera iteración del proceso de optimización) son mostrados en la segunda columna. En la tercera columna se muestran los nuevos valores luego de aplicar la Ec. 18.

El comportamiento del proceso de optimización cuando se encuentra cerca del punto de convergencia se ilustra en la Tab. VII, tomando como ejemplo el material de tipo *Telón* (aplicado a 2 superficies de contorno de la sala). Aquí se detecta una oscilación en la banda de 250 Hz. Esto es, el ajuste que se produce en el coeficiente al aplicar la Ec. 18 para la iteración 6 (cuarta columna de la tabla), genera el mismo valor que se tenía en la iteración 4 (detallada en la segunda columna de la tabla). Por tal motivo, es aplicada la Ec. 19 obteniendo como resultado los valores que se encuentran en la quinta columna de la tabla.

Tabla VI

APLICACIÓN DE LA EC. 18 PARA OPTIMIZACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DEL MATERIAL *Cortinas*, EN LA ITERACIÓN $k = 1$

bf [Hz]	α_{k-1}	α_k	P_c [%]
125	0,03	0,04	33,33
250	0,12	0,07	41,67
500	0,15	0,05	66,67
1000	0,27	0,07	74,07
2000	0,37	0,12	67,57
4000	0,42	0,17	59,52
Promedio			57,14

Tabla VII

APLICACIÓN DE LA EC. 19 EN LA BANDA DE 250 HZ PARA OPTIMIZACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DEL MATERIAL *Telón*, EN LA ITERACIÓN $k = 6$.

f (Hz)	α_{k-2}	α_{k-1}	α_{kt}	α_k	Dif. [%]
125	0,06	0,06	0,06	0,06	0,00
250	0,09	0,10	0,09	0,10	0,00
500	0,17	0,18	0,19	0,19	5,56
1000	0,19	0,19	0,19	0,19	0,00
2000	0,15	0,17	0,19	0,19	11,76
4000	0,11	0,10	0,09	0,09	10,00
Promedio					4,55

Para conocer cual es el *porcentaje de cambio real* se aplicó la Ec. 21 y los resultados se pueden observar en la Fig. 14. Naturalmente, los materiales que experimentaron el mayor porcentaje de cambio fueron justamente aquellos que cubren superficies mas grandes dentro de la sala.

Dado que este proceso de optimización se basó en diferencias existentes entre los PCA (generados con datos medidos y simulados), a continuación se presentan los errores relativos que se calcularon al inicio y al final del ajuste. Los resultados que se presentan en la Fig. 15, muestran la mejoría obtenida considerando el parámetro T_{30} . Por ejemplo, en la banda de 1 kHz el error relativo presentaba desvíos del 36 % y al final se alcanza un desvío de apenas el 1 %, representando una disminución de 35 puntos porcentuales.

En la Figura 16 se considera el parámetro EDT . Aquí se puede verificar un comportamiento similar al que se obtuvo con el parámetro T_{30} . Considerando la misma banda de frecuencia (1 kHz), el procedimiento evidencia una reducción de 34 puntos porcentuales en el error relativo promedio.

Tomando en cuenta el T_s (el centroide de la respuesta impulsiva de la sala captada en cada receptor), un parámetro que no fue considerado para definir los ajustes aplicados en el procedimiento de optimización, también se evidencian mejoras importantes ilustradas en la Fig.17.

La Figura 18 muestra los valores calculados para el parámetro EDT para el receptor R_1 . Aquí se puede observar la evidente diferencia que existe entre los resultados de la simulación 1 y la simulación 9. Además es notable como el parámetro calculado en esta última simulación tiene un desvio del 5.5 % al dato real en todas las bandas de octava consideradas.

De forma análoga, la Fig. 19 presenta el parámetro T_{30} calculado con datos provenientes de la simulación 1, simulación 9 y las mediciones experimentales para el receptor R_2 . Nuevamente, los resultados de la simulación final se acercan

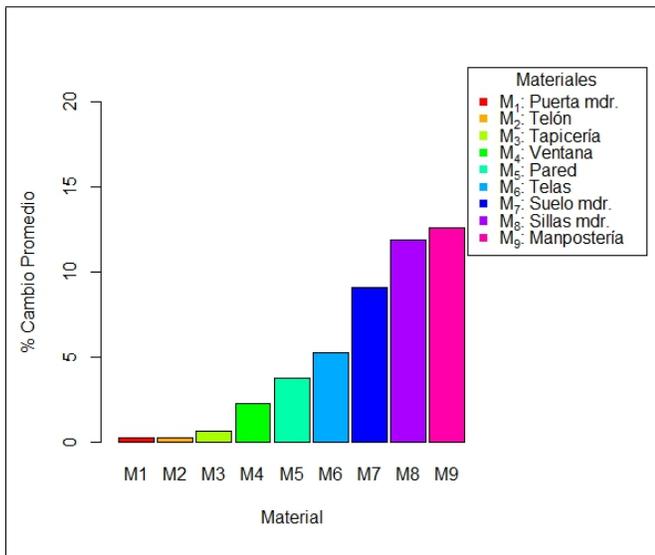


Figura 14. Porcentaje de cambio real de cada material

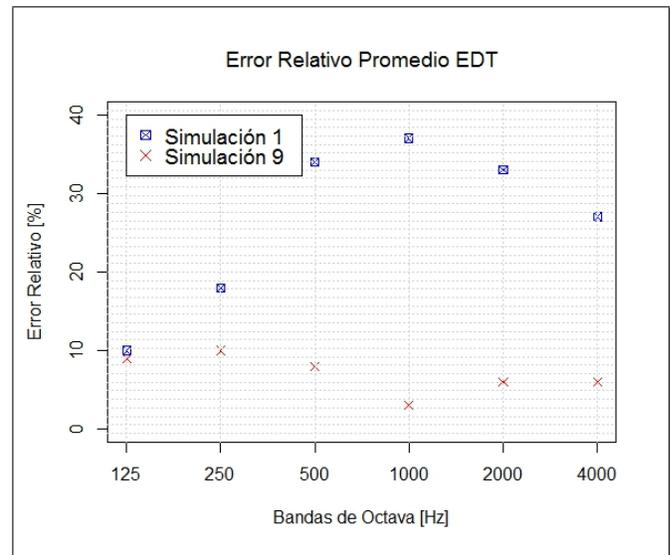
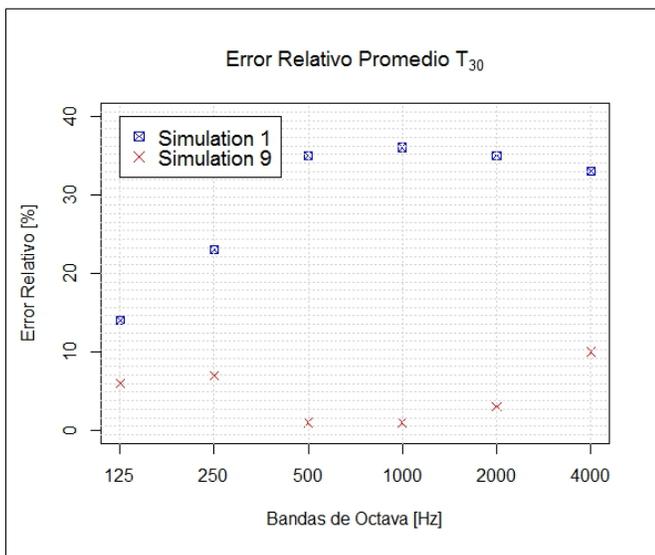
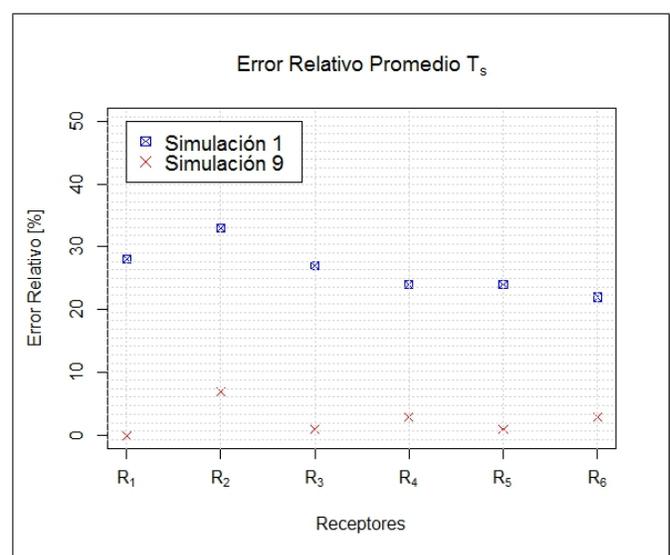


Figura 16. Error Relativo Promedio del EDT

Figura 15. Error Relativo Promedio del T_{30} Figura 17. Error Relativo Promedio T_s

al parámetro calculado con datos medidos en todas las bandas de octava consideradas, lo cual contrasta con el resultado de la primera simulación.

Finalmente, la Fig. 20 muestra el comportamiento del parámetro T_s registrado en todos los receptores de la sala. Se puede observar nuevamente que la evidente evolución de los resultados obtenidos en la simulación 1 y la simulación 9, comparados con el valor real en todos los receptores de la sala.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados presentados en la Sección IV evidencian la importancia que tienen los coeficientes de absorción en un sistema de simulación numérica acústica. Cuando estas variables de entrada son ajustadas, el simulador es capaz de producir respuestas impulsivas con las cuales se pueden calcular parámetros de calidad acústica muy similares a los que

se obtienen con datos medidos experimentalmente. Los errores porcentuales promedio observados en los parámetros EDT y T_{30} (ver Tabs. IV y V), muestran una reducción importante, pasando del 48 % (calculado en la primera iteración) al 0 % (en la última iteración).

También se evidencia que cerca del punto de convergencia, el procedimiento es exitoso para refinar el ajuste de los coeficientes. La Tabla VII, muestra la ocurrencia de una oscilación (es decir el procedimiento de ajuste produce un valor que ya se había alcanzado en iteraciones anteriores). Esta característica es similar al papel que cumple la “temperatura” en el método de “temple simulado”, limitando la magnitud de la corrección cuando el procedimiento está cerca de finalizar la optimización.

El procedimiento de optimización toma a los parámetros EDT y T_{30} como referencia para definir el valor de corrección en los coeficientes en cada banda de frecuencia. A pesar de es-

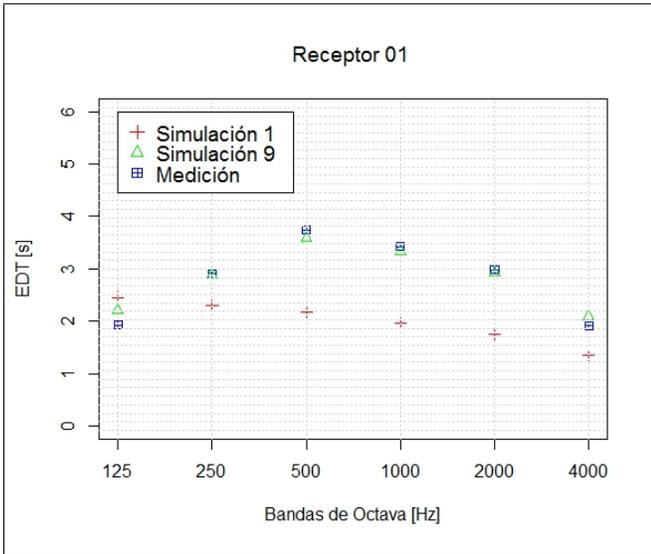


Figura 18. Comparación del EDT calculado en el receptor 1 con datos de mediciones experimentales (cuadrados), información de la simulación inicial (cruces) y resultados de la simulación final (triángulos).

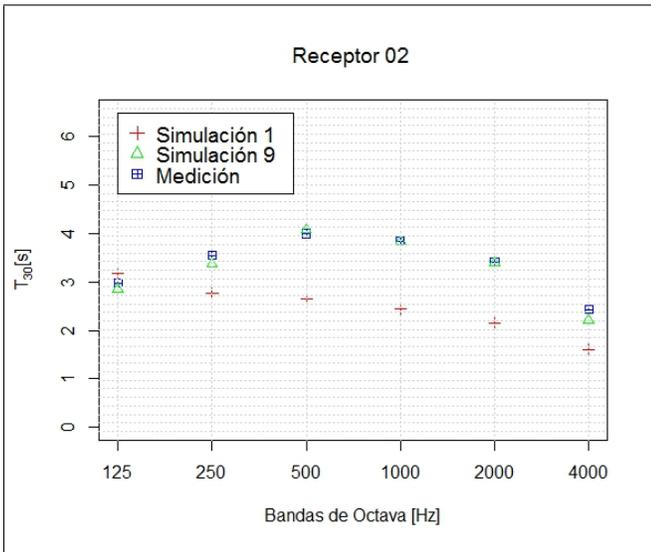


Figura 19. Comparación del T_{30} calculado en el receptor 1 con datos de mediciones experimentales (cuadrados), información de la simulación inicial (cruces) y resultados de la simulación final (triángulos).

to, se pudo observar que el T_s también mejoró sustancialmente reduciendo su error relativo promedio en todos los receptores de 26,27 % a 2,72 %.

El desempeño del procedimiento también fue comparado con estudio similares. Para el caso descrito en este trabajo, se usó una sala con un volumen de 5057,63 m³, con una fuente omnidireccional de la cual partieron 1×10^5 rayos, seis receptores distribuidos en diferentes lugares de la sala y nueve materiales distribuidos en un área de 3453,82 m². En el estudio realizado por C. L. Christensen [9], se usan fuentes que emiten 2×10^3 rayos, en una sala con un área de 937,6 m². Su método de ajuste es una optimización con algoritmos genéticos, mientras que el procedimiento aquí aplicado se puede describir como un ascenso de colinas modificado. Es

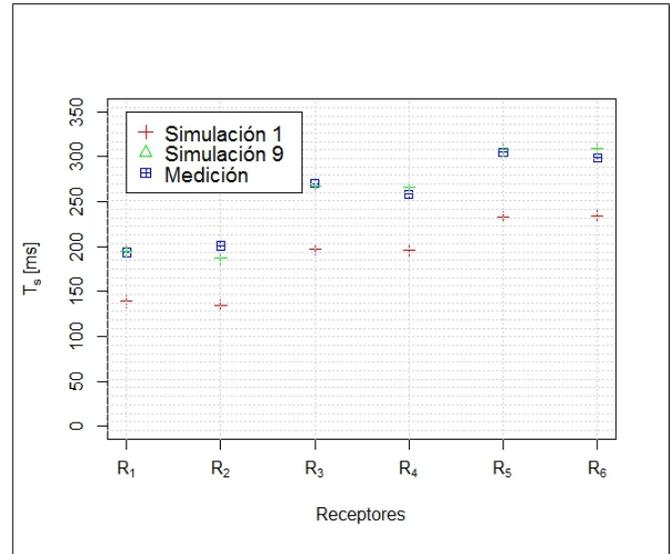


Figura 20. Comparación del T_s calculado en todos los receptores de la sala con datos de mediciones experimentales (cuadrados), información de la simulación inicial (cruces) y resultados de la simulación final (triángulos).

importante resaltar que, en comparación al otro estudio, el procedimiento descrito en este trabajo se desarrolla en una sala antigua (con evidentes deterioros por el paso del tiempo), con alta reverberación (aproximadamente 3.6 segundos), con una mayor complejidad geométrica, actuando sobre materiales distribuidos en un área 3.68 veces mas grande.

En la Tabla VIII se puede observar algunos datos comparativos entre el procedimiento de algoritmos genéticos (AG) y el algoritmo de ascenso de colinas modificado (ACM). En la primera fila, la diferencia en el ajuste de la última iteración para el promedio del EDT a 4 kHz en todos los receptores es de una centésima. Si tomamos los receptores que registran mayor desvío en el EDT, el promedio de error en todas las bandas de frecuencia muestran que el procedimiento AG alcanza el 3%, mientras que el ACM llega al 6%. No obstante, es importante señalar que los puntos de partida fueron diferentes. En el caso del método AG, el procedimiento reduce el error en 23 puntos porcentuales, mientras que el procedimiento ACM reduce el error en 28 puntos porcentuales. En el caso del T_{30} , se toma el receptor con desvío medio y se puede observar que el procedimiento ACM consigue una reducción de 24 puntos porcentuales, frente a la reducción de AG que es de 7 puntos porcentuales. Finalmente, para el T_s se tomó el receptor que poseía el segundo mayor desvío. En este caso se observa que ambos parten con el mismo error (28%), pero en la simulación final el procedimiento AG alcanza un error del 7%, mientras que el ACM llega al 0.44%. Es importante recordar, que el procedimiento ACM no considera el valor del T_s para definir el porcentaje de corrección.

VI. CONCLUSIONES

El presente trabajo es un abordaje de ascenso de colinas modificado para corregir coeficientes de absorción de materiales utilizados en una simulación numérica acústica. Dicho procedimiento está basado únicamente en los parámetros T_{30}

Tabla VIII
ERROR RELATIVO COMPARATIVO ENTRE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA

	AG		ACM	
	Simulación inicial	Simulación final	Simulación inicial	Simulación final
Promedio EDT a 4 kHz	31.76	4.52	26.43	5.52
Promedio global en receptor más desviado	27.14	2.96	34.40	6.16
Promedio T_{30} a 250 Hz	27.24	4.18	22.99	6.62
Promedio global en receptor con desvío medio	11.87	5.00	28.41	3.55
T_s global en 2do receptor más desviado	28.17	7.05	28.26	0.44

y EDT , alcanzando desvíos de aproximadamente 5,83% entre los PCAs medidos y simulados, lo cual contrasta con los valores iniciales, que presentaba un desvío promedio del 27,92%. A pesar de estar basado en apenas dos parámetros, el procedimiento también consigue ajustar otros parámetros tales como el T_s , el cual inicialmente presentaba un desvío promedio del 25,87% y alcanzó un 3,18% después de la última iteración de ajuste de coeficientes.

El procedimiento fue aplicado en una sala grande con un comportamiento acústico complejo (alta reverberación, superficies de contorno deterioradas por el tiempo). A pesar de eso, los resultados demuestran que la precisión del procedimiento es comparable con estudios que persiguen el mismo fin, usando procedimientos de optimización más complejos, pero aplicados en salas más sencillas.

Otros parámetros como el C_{50} y D_{80} , no fueron considerados porque la sala poseía elementos que favorecen a la difusión del sonido (las bancas de madera) y el procedimiento no incluye una optimización de los coeficientes de difusión. Esta particularidad será abordada en futuros trabajos, así como la inclusión de otros parámetros para definir el valor de corrección dentro del proceso de optimización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Escuela Politécnica Nacional al proyecto de investigación que permitió que este trabajo pueda realizarse. Así mismo, los autores agradecen la colaboración del Laboratorio de Instrumentación en Dinámica, Acústica y Vibraciones (LIDAV) que realizó las diversas mediciones experimentales acústicas del Teatro Anchieta.

REFERENCIAS

- [1] I. Bork, "A comparison of room simulation software-the 2nd round robin on room acoustical computer simulation," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 86, no. 6, pp. 943-956, 2000.
- [2] M. Vorländer, *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [3] ISO3382, "Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters," *Acoustics*, 1997.
- [4] J.-J. Embrechts, "Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 51, no. 6, pp. 288-295, 1982.
- [5] S. Dance and B. Shield, "The complete image-source method for the prediction of sound distribution in non-diffuse enclosed spaces," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 201, no. 4, pp. 473-489, 1997.
- [6] U. M. Stephenson, "Quantized pyramidal beam tracing-a new algorithm for room acoustics and noise immission prognosis," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 82, no. 3, pp. 517-525, 1996.
- [7] D. Alarcão, J. B. Coelho, and R. Tenenbaum, "On modelling of room acoustics by a sound energy transition approach," in *Proc. of EEA symposium on architectural acoustics*. Madrid. Citeseer, 2000.
- [8] H. Kuttruff, *Room acoustics*. Crc Press, 2009.
- [9] C. L. Christensen, G. Koutsouris, and J. H. Rindel, "Estimating absorption of materials to match room model against existing room using a genetic algorithm," *Proceedings of Fourm Acusticum*, pp. 7-12, 2014.
- [10] Dalenbäck, *Datensatz der CATT-Software*. Data-Category in CATT: BRICK PLASTERED, C: Walls, D: Plastered, 2000.
- [11] C. Harris, *Noise Control in Buildings*. McGraw Hill, 1994.
- [12] Harris, *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*. McGraw Hill, 1991.
- [13] A. Pilch, "Optimization in the validation of the room acoustic model," *Proceedings of EuroRegio*, 2016.
- [14] R. A. Tenenbaum, T. S. Camilo, J. C. B. Torres, and S. N. Gerges, "Hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: part 1-theoretical and numerical aspects," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 211-221, 2007.
- [15] L. L. Beranek, "Acoustics," 1996.
- [16] D. Alarcão, J. Bento Coelho, and R. Tenenbaum, "On modeling of room acoustics by a sound energy transition approach," in *Proceedings of EEA Symposium on Architectural Acoustics*, 2000.
- [17] P. Brunet Crosa, F. J. Santistevy Puyuelo, A. Vilanova, L. Chiarabini, G. Patow, E. Staffetti, and J. Suriñach Caralt, "Estructuras geométricas jerárquicas para la modelización de escenas 3d," 1999.
- [18] A. C. Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Univ. Politèc. de Catalunya, 1998, vol. 4.
- [19] H. Haas, "The influence of a single echo on the audibility of speech," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 20, no. 2, pp. 146-159, 1972. [Online]. Available: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=2093>
- [20] V. S. Gomez de Melo, "Inteligibilidade de salas de aula do ensino fundamental e avaliação de qualidade acústica via respostas biauriculares obtidas com cabeça artificial de dimensoes infantis," Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [21] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 37, no. 3, pp. 409-412, 1965.
- [22] M. Abad Sorbet, "Estudio acústico y electroacústico de la sala de conciertos ritmo y compás (madrid)," Ph.D. dissertation, E_Telecomunicacion, 2013.
- [23] R. A. Tenenbaum, T. S. Camilo, J. C. B. Torres, and L. T. Stutz, "Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: part 2-validation of the computational code raios 3," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 222-231, 2007.
- [24] S. P. Russell Norvig, *Artificial intelligence a modern approach*. Stéphane Deconinck, 2010.
- [25] A. Gade, "Acoustics in halls for speech and music," in *Springer handbook of acoustics*. Springer, 2007, pp. 301-350.



Gandhi S. Mora Guevara Estudiante egresado de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (EPN). Fue ayudante de investigación en el área de simulación numérica acústica durante el periodo 2015-2016. Su trabajo se centró principalmente en técnicas de optimización para coeficientes de absorción acústica en modelos de recintos cerrados. Actualmente presta sus servicios profesionales en la EPN en calidad de Desarrollador e Investigador en Aprendizaje Automático.



Luis A. Bravo Moncayo Ingeniero Acústico por la Universidad Austral de Chile. Entre el 2003 y 2012 se desempeñó como coordinador académico de la carrera de Ingeniería en Sonido y Acústica en la Universidad de las Américas en Quito con funciones docentes, de gestión administrativa y de investigación. En 2006 obtuvo un Máster Executive en Gestión Integral: Calidad, Medio Ambiente y Prevención de Riesgos Laborales por la Escuela de Organización Industrial en Madrid, España. En 2009 obtuvo un título de Magíster en Administración de Empresas con mención en Marketing por la Universidad de las Américas. Actualmente cursa el programa de Doctorado en Ingeniería Acústica en la Universidad Politécnica de Madrid, y es docente de Acústica Ambiental y Metodología de Investigación en la Universidad de las Américas. Ha sido consultor en temas de control de ruido, acústica arquitectónica y ambiental en diferentes instituciones públicas y privadas en Ecuador.



José F. Lucio Naranjo Ingeniero en Sistemas y Computación por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (2005). Máster y Ph.D. en Modelado Computacional por la Universidad del Estado de Río de Janeiro (2010 y 2014 respectivamente). Su investigación doctoral fue reconocida y apoyada por la Acoustical Society of

América mediante ASA International Student Grant. Su principal campo de estudio está enfocado en técnicas de simulación numérica e inteligencia computacional aplicadas al modelado de la propagación acústica y a la generación de realidad virtual. Actúa como investigador y profesor titular de sistemas y computación en la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (EPN) y también como profesor e investigador a tiempo parcial en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE). También ha actuado como profesor en la Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ), la Universidad Federal Fluminense, la Universidad de las Américas (UDLA) y la Universidad Central del Ecuador (UCE). Fue miembro de la Sociedad Brasileña de Acústica (SOBRAC).