

TP3 - SIMULACIÓN COMPUTACIONAL BASADA EN ACÚSTICA GEOMÉTRICA DE UNA SALA DE CONCIERTOS

Alejo Cohen

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: cohen51134@estudiantes.untref.edu.ar

Ciro Lockey

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: lockey51042@estudiantes.untref.edu.ar

Jeronimo Igoldi

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: jeroigoldi10@gmail.com

Sebastian Carro Morais

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: carro57195@estudiantes.untref.edu.ar

En este artículo se presenta el desarrollo del modelado acústico en el software EASE del auditorio de la Usina del Arte, ubicado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, con el objetivo de estimar los valores totales y por bandas de los parámetros acústicos STI, %ALcons, RT, EDT, Claridad, Definición, SPL, Eco Speech, Eco Music, D/R, y compararlos con los obtenidos mediante respuestas al impulso (RI) reales medidas en el recinto, evaluando la precisión de la simulación. El mapeo del auditorio con RI se hace de acuerdo a lo establecido por la Norma ISO 3382. Se exponen los resultados obtenidos y su respectivo análisis. Se concluye que, en general, los valores obtenidos no resultaron lo suficientemente confiables como para realizar una representación adecuada de la sala.

Keywords: acústica geométrica, simulación acústica, EASE, parámetros acústicos.

1. Introducción

La modelización acústica con software especializado como EASE permite simular el comportamiento sonoro de un auditorio en tres dimensiones. Mediante trazado de rayos y acústica geométrica, se estiman parámetros como RT, STI o SPL, según la norma ISO 3382, considerando materiales y coeficiente de dispersión. Estas simulaciones anticipan resultados comparables a mediciones reales, optimizando el diseño desde etapas tempranas.

En el presente informe se detalla el proceso de simulación tridimensional y acústica en el software EASE del auditorio sinfónico principal de la Usina del Arte, centro cultural situado en la Ciudad de Buenos Aires. De este recinto se disponen las respuestas al impulso y parámetros acústicos medidos, los cuales están publicados en la librería online OpenAIR, desarrollada en el departamento de Electrónica de la Universidad de York, Inglaterra [21]. El objetivo consiste en modelar el recinto y ajustar las condiciones de la simulación para obtener resultados similares a los parámetros reales.

La Usina del Arte, actual centro cultural y sala de espectáculos que ocupa el viejo edificio de la vieja Usina Termoeléctrica Don Pedro de Mendoza, en el barrio de la Boca, es el resultado de un proyecto de restauración y recuperación arquitectónica, luego de que el recinto industrial haya sido abandonado en la década de 1990. El proyecto incluyó una sala sinfónica, una sala de cámara, una sala de ensayos, foyer y varios salones de exposiciones. Se mantuvo la fachada original del edificio, preservando el diseño original, y la acústica de la sala sinfónica fue estudiada y diseñada por los Ingenieros Rafael Sánchez Quintana y Gustavo Basso. Se puede visualizar una imagen del interior de la sala en la Figura 1. [9], [28].



Figure 1: Sala sinfónica, vista desde el balcón trasero superior.

Los revestimientos de auditorio están en su mayoría compuesto por madera de Guatambú, tanto en los pasillos, balcones laterales, escenario y respaldos de las butacas, las cuales constan de unas almohadillas realizadas en espuma de poliuretano inyectada, según informa el fabricante Rassegna en su modelo 'Zeta 2' [26].

A su vez, un gran reflector está ubicado por encima del escenario, se visualizan en las fotografías algunas paredes laterales de ladrillo sin revocar, y difusores numéricos QRD7 distribuidos por toda la sala. En su conjunto, contiene un volumen de 15.700 m^3 , 1200 butacas distribuidas en 3 pisos laterales de balcones, un área de escenario de 193 m^2 y un área de audiencia total de 817 m^2 .

En primera instancia, se estableció contacto con el personal técnico de la sala a modo de procurar los planos de la misma. Con ellos se realizó el modelo tridimensional en SketchUp y, partiendo de un modelo geométrico simplificado de la sala, este fue importado a EASE 4.3 para realizar su simulación acústica. Luego, se procesaron las respuestas al impulso obtenidas para compararlas con aquellas provenientes de mediciones reales, y se llevó a cabo un proceso iterativo de ajustes en las superficies y sus propiedades a modo de aproximar la simulación al caso real. Los resultados obtenidos no resultaron satisfactorios en general, debido a la imposibilidad de llegar a valores coherentes con lo adquirido de las RIRs reales. El análisis general radica en que el campo reverberante en bajas frecuencias presenta un excedente energético respecto a lo mostrado por las mediciones.

2. Estado del Arte

La modelización acústica de salas ha avanzado significativamente en las últimas décadas, siendo una herramienta clave para el diseño, análisis y validación de espacios como auditorios y salas de concierto. Existen diversos métodos, enfoques y desarrollos recientes que han mejorado tanto la precisión como la eficiencia de las simulaciones.

Históricamente, los dos métodos más utilizados para la simulación geométrica de recintos son el de fuentes imagen y el trazado de rayos. El método de fuentes imagen, propuesto por Allen y Berkley [4], se basa en reflejar la fuente sonora en los planos de las superficies, generando fuentes virtuales ubicadas simétricamente respecto a cada plano. Por otro lado, el trazado de rayos [17] utiliza

una gran cantidad de partículas que se propagan desde la fuente y son reflejadas y atenuadas según los coeficientes de absorción de cada superficie. Posteriormente, surgieron modelos híbridos que combinan ambos enfoques para aprovechar sus respectivas ventajas, como proponen Rindel y otros investigadores [27]. Estos métodos requieren una representación precisa de la geometría del recinto y de las propiedades físicas de los materiales, como absorción y difusión, para que los resultados se acerquen a las condiciones reales.

A frecuencias bajas, los métodos basados en ondas como el Método de Elementos Finitos (FEM), el Método de Elementos de Contorno (BEM) y el Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD) permiten una simulación más exacta del campo sonoro. Sin embargo, su alto costo computacional restringe su aplicación a escenarios específicos [22].

Numerosos estudios han comparado resultados de simulaciones con mediciones reales. Mahjoob y Malakooti [19] demostraron que el tamaño del espacio considerado para la medición acústica es un factor crítico en la precisión de la simulación. Ye y Fu [30], mediante el uso del software EASE, hallaron mayor exactitud en posiciones de escucha simétricas dentro del recinto.

Brinkmann et al. realizaron una comparación entre distintos programas de simulación y evidenciaron limitaciones significativas [12]. Encontraron errores frecuentes cuando la suposición de superficies perfectamente reflectantes no se cumplía, así como una pobre predicción de reflexiones tempranas fuera del rango de 500 a 2000 Hz. Además, observaron que las auralizaciones generadas eran fácilmente distinguibles de las obtenidas por mediciones reales. Las causas de estas discrepancias se atribuyen principalmente a simplificaciones en los coeficientes de absorción y difusión, así como a una modelización insuficiente de la difracción. Para mejorar esta cuestión, se creó la base de datos BRAS (Benchmark for Room Acoustical Simulations), que permite comparar simulaciones basándose en fenómenos acústicos aislados, funcionando como un indicador de la calidad de estos softwares [11].

En los últimos años han surgido diversas investigaciones que buscan mejorar tanto la precisión como la velocidad de las simulaciones. Neidhardt et al. exploran cómo adaptar modelos acústicos para mejorar su realismo perceptual en aplicaciones de realidad aumentada auditiva, señalando que aún no se comprende completamente la relación entre propiedades físicas y atributos perceptivos de los recintos [20].

Autio, Vardaxis y Hagberg desarrollaron un algoritmo de trazado de rayos iterativo que permite realizar cálculos en tiempo real sin perder precisión [7]. Asimismo, Autio y Nilsson propusieron un modelo de difusión que evita asumir una distribución uniforme de la energía [6], abordando uno de los principales problemas planteados por Brinkmann.

Zhang y Wang propusieron fórmulas eficientes para modelos que consideran condiciones extremas como temperatura y viento [31]. También se han aplicado técnicas de inteligencia artificial; Borrel-Jensen et al. desarrollaron un sistema de simulación en 3D usando operadores neuronales profundos, lo que permite modelar posiciones de fuente paramétricas con alta eficiencia [10].

Finalmente, Llopis et al. introdujeron el método de bases reducidas (RBM), que permite simular recintos con características no homogéneas, con mayor velocidad sin perder precisión [18].

3. Marco Teórico

3.1 Parámetros acústicos temporales

Los siguientes parámetros, definidos por la Norma ISO 3382-1 [1], están relacionados con el comportamiento del sonido en el tiempo, especialmente cómo decae después de emitirse una fuente sonora. Se presentan valores recomendados por la norma promediando los valores por frecuencia, en recintos multipropósitos y salas de conciertos desocupados, de hasta 25000 m^3 . También, se muestran valores según lo recomendado por Gade[15] para salas de música de cámara (2500 m^3) y salas sinfónicas (25000 m^3).

3.1.1 Tiempo de Reverberación (RT)

El Tiempo de Reverberación es definido como el tiempo necesario para que el nivel de presión sonora disminuya 60 dB en un recinto desde el instante en que la fuente sonora deja de emitir.

Debido a la dificultad de encontrar un piso de ruido menor a 60 dB (y por ende conseguir una relación S/R mayor a ese nivel), se suelen utilizar parámetros equivalentes que buscan medir la misma característica, pero para un decaimiento de nivel menor. La norma define al T_{20} y T_{30} como los tiempos en que el nivel emitido por la fuente disminuye 20 dB y 30 dB, respectivamente. Se considera que el sonido directo deja de influir cuando el nivel decrece 5 dB, por lo tanto, se miden desde el tiempo que se tiene dicho valor hasta una caída de 25 dB y 35 dB, respectivamente. La misma norma define al $T_{30_{mid}}$ y $T_{20_{mid}}$ como el promedio de los tiempos obtenidos en las bandas de octava de 500 Hz y 1000 Hz.

El parámetro es medido por una regresión lineal de cuadrados mínimos sobre la curva de decaimiento energético, debiendo extrapolarse hasta -60 dB en el caso del T_{20} y T_{30} .

Por otro lado, para establecer el límite entre las regiones determinísticas y estocásticas de la respuesta al impulso en un recinto, se define el Tiempo de Transición (T_t) como el instante en que la energía acumulada de dicha respuesta la sala alcanza el 99% de la energía total.

Según Gade, el RT_{60} para una sala de conciertos de música de cámara es de 1,5 s y para sala sinfónica entre 2,0 y 2,4 s.

3.1.2 Early Decay Time (EDT)

Se define al Early Decay Time (EDT) como una medida del decaimiento del sonido en una sala, basado en los primeros 10 dB de caída de nivel. En recintos donde se asume un campo sonoro difuso, el decaimiento es lineal, por lo que el RT y EDT serían idénticos. Se ha demostrado que el EDT está mejor relacionado con la percepción de la reverberación que el T_{60} .

Los valores típicos según la norma que lo define para el tipo de sala ya mencionado están dentro del rango de 1 s a 3 s.

3.1.3 Definición (D50)

Este parámetro expresa una relación entre la energía temprana y la energía sonora total en el recinto. Se toma un valor de 50 ms como el tiempo de transición entre el campo temprano y el tardío. Su expresión matemática de cálculo es:

$$D_{50} = 10 * \log \frac{(\int_{0ms}^{50ms} p^2(t) dt)}{(\int_{0ms}^{\infty} p^2(t) dt)} [dB] \quad (1)$$

La norma recomienda valores de Definición entre 0,3 y 0,7.

3.2 Parámetros acústicos espaciales

Estos parámetros cuantifican cómo se distribuye el sonido en el espacio, y están estrechamente relacionados con la sensación de espacialidad o envoltencia sonora.

3.2.1 Speech Transmission Index (STI)

El STI es un parámetro objetivo utilizado para cuantificar la inteligibilidad de la palabra en sistemas de transmisión acústica, tales como sistemas de sonido, comunicaciones y ambientes arquitectónicos.

El cálculo se basa en la medida de la modulación de la señal vocal a través del canal acústico, considerando los efectos de ruido, reverberación, distorsión y otros factores que degradan la transmisión

del habla. El método evalúa la pérdida de modulación en varias bandas de frecuencia y en diferentes velocidades de modulación, reproduciendo así las condiciones reales de percepción del habla humana.

Según la norma UNE EN 60268-16, el STI se define como un índice adimensional que varía entre 0 y 1, donde: STI = 0 representa una inteligibilidad nula (la palabra no es entendible) y un STI = 1 representa una inteligibilidad perfecta (la palabra se entiende completamente).

3.2.2 Direct to Reverberant Ratio (D/R)

El parámetro D/R representa la relación en dB entre el sonido directo percibido por el oyente y el sonido reverberante [23]. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\frac{D}{R} = 10 * \log \left(\frac{\int_0^Q p^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt} \right) [dB] \quad (2)$$

En condiciones óptimas, se busca que el D/R esté entre +6 dB y +10 dB para tener una buena inteligibilidad, incluso en salas muy reverberantes.

3.2.3 Articulation Loss of Consonants (%AlCons)

Este parámetro se refiere al porcentaje de consonantes que se pierden durante la transmisión del habla en el recinto, debido principalmente a la distancia entre el oyente y la fuente sonora, en relación con la distancia crítica del ambiente [24]. En consecuencia, se ve fuertemente influenciado por el tiempo de reverberación del recinto. Su expresión es:

$$\%AlCons = 0,652 * \left(\frac{r_{LH}}{r_H} \right)^2 * T_{60} [\%] \quad (3)$$

siendo r_{LH} la distancia del oyente a la fuente y r_H el radio de reverberación, que, en el caso de fuentes omnidireccionales, es la distancia crítica r_R .

Además, Peutz estableció que para garantizar una inteligibilidad aceptable, el %AlCons debe ser menor al 10%, idealmente por debajo del 5%. Un %AlCons por encima del 20% implica una pobre inteligibilidad.

3.2.4 Echo Criterion (EK)

El Echo Criterion es definido como la relación entre el incremento de energía en un determinado intervalo de tiempo [5]. Sirve para evaluar objetivamente el fenómeno de escucha doble asociado a la llegada sucesiva del sonido directo y reflejado. La siguiente expresión calcula el intervalo temporal que caracteriza a la curva de eco a partir de la respuesta al impulso $h(t)$, siendo t_s el tiempo central.

$$t_s(\tau) = \frac{\int_{t=0}^{\tau} |p(t)|^n t dt}{\int_{t=0}^{\tau} |p(t)|^n dt} \quad (4)$$

Luego, se calcula el EK mediante el cálculo:

$$EK = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau_E} = \frac{t_s(\tau) - t_s(\tau - \tau_E)}{\Delta \tau_E} \quad (5)$$

siendo τ_E la duración efectiva de la autocorrelación. Vale aclarar que $n = 1$ y $\tau_E = 14 ms$ para música, y $n = \frac{2}{3}$ y $\tau_E = 9 ms$ para palabra.

Ando define un umbral temporal de alrededor de $50ms$ a partir del cual las reflexiones generan una clara sensación de eco.

3.2.5 Lateral Fraction (LF)

Este parámetro describe la cantidad de energía sonora lateral que llega al oyente[8]. Se define como la razón entre la energía sonora captada por un micrófono de patrón bidireccional (orientado con sus nulos hacia la fuente sonora) y la energía medida por un micrófono omnidireccional, tal como se muestra a continuación:

$$LF = 10 * \log \frac{(\int_{10ms}^{80ms} P_{bidireccional}^2(t) dt)}{(\int_{0ms}^{80ms} P_{omnidireccional}^2(t) dt)} [dB] \quad (6)$$

Gade [15] propone valores dentro de los rangos de 0, 15 a 0, 20 para música de cámara y de 0, 20 a 0, 25 para sinfónica.

3.3 Just Noticeable Difference (JND)

El JND es la mínima variación en una magnitud o estímulo que un observador puede detectar y percibir como un cambio real. Este umbral se determina mediante pruebas experimentales y estudios subjetivos, y su valor puede variar según el tipo de estímulo y las condiciones de la percepción. La Tabla 1 presenta valores típicos de JND para diferentes parámetros relevantes en este estudio.

Table 1: Valores de JND para los parámetros presentados.

Parámetro	JND
T_{30}	5%
EDT	5%
D_{50}	5%
STI	3%
D/R	2 dB
%AlCons	3%
LF	5%

4. Procedimiento

En primer lugar, se obtuvieron las RIR medidas del auditorio bajo análisis en el repositorio virtual OpenAir, registradas por Alejandro Bidondo, Leandro Rodiño y Nahuel Cacavelos en 2014 [29].

A través de la motivación de modelar este recinto, se hizo contacto con el personal técnico de la Usina del Arte para solicitar los planos de la sala, los cuales fueron proporcionados. Debido a la complejidad de los planos de la sala recibidos, fueron simplificados para importarlos a SketchUp y a través del plano horizontal y transversal proyectar las superficies y generar el modelo 3D, teniendo en cuenta de no dejar volúmenes internos sino teniendo un único volumen para la simulación en EASE. En la Figura 2 se observan capturas de las vistas utilizadas para este modelado. Además, como referencia, se muestran imágenes adicionales del diseño del auditorio en el Anexo 1, con vistas laterales y desde el escenario (Figuras 16 y 15 respectivamente).

Se realizó un proceso iterativo de prueba y error en el ensamblaje de las superficies, ya que el software indicaba errores en el cerramiento del recinto. Se simplificaron progresivamente las superficies del modelo, limitándose a la representación básica de la geometría del auditorio real, a modo de facilitar su posterior simulación acústica, evitando problemas computacionales debido a geometrías complejas. Luego de aplicar las mencionadas correcciones, el modelo 3D pudo ser importado a EASE sin indicación de errores. En la Figura 3 se visualiza el modelo realizado en Sketchup.

Se realizó una selección y división por capas acorde a los materiales de las superficies, lo cual fue útil al momento de aplicar los materiales en EASE, obtenidos por medio de inspección visual

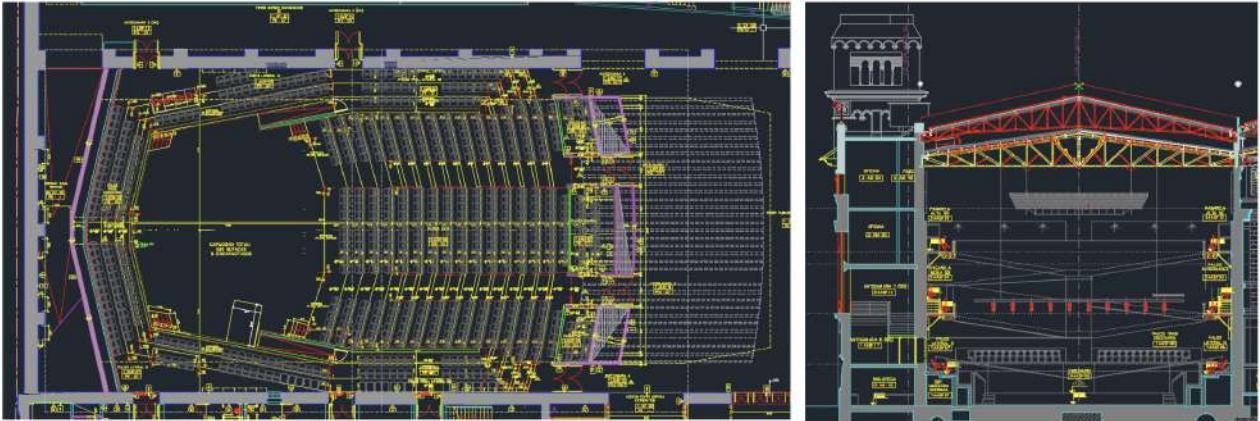


Figure 2: Vista Superior y vista transversal del auditorio.

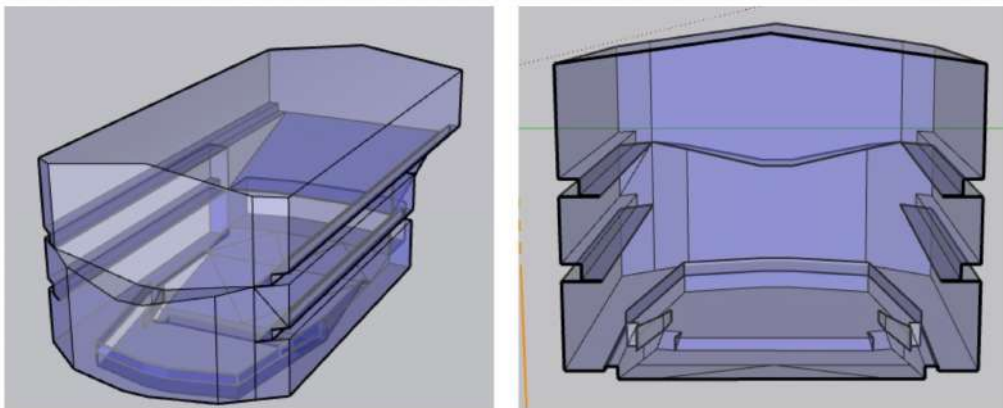


Figure 3: Vistas del modelo 3D en SketchUp.

de fotografías y videos del centro cultural [25], [16], los cuales fueron divididos en las siguientes categorías: audiencia (absorción de butacas), paredes de madera (Guatambú), cemento alisado (pared detrás del escenario), ladrillo sin revocar (paredes traseras de balcones), difusores de madera QRD7. Se puede apreciar una vista del modelo en EASE en la Figura 4.

Una vez cargado el modelo y los materiales, se situaron las posiciones de los oyentes y las áreas de audiencia, lo que refiere a los planos de medición que utiliza este software. Se tuvo en cuenta cumplir con lo establecido por la norma ISO 3382 [1] en función del volumen y cantidad de butacas. Considerando que la posición de cada una representa un punto de medición, se debió limitar esta cantidad para evitar extender de forma innecesaria el tiempo de cómputo. Esta norma establece un mínimo de ocho posiciones de medición para un auditorio de más de mil personas, aunque en este caso se decidió utilizar 16 posiciones, lo cual supera lo sugerido por la norma y a las mediciones reales usadas como referencia. La decisión de establecer más posiciones tiene que ver con evaluar la respuesta acústica de la sala en su totalidad, procurando utilizar los distintos puntos representativos del auditorio. La Figura 5 muestra la disposición utilizada en las áreas de audiencia.

En primera instancia, se colocó una única posición de fuente omnidireccional en el escenario, a 1.5 metros del suelo. Si bien esta decisión es una simplificación del caso real de orquesta a reproducir y la norma sugiere un mínimo de 2, se optó de esta manera para reducir los tiempos de procesamiento y cómputo. Con dichas configuraciones realizadas, se avanzó hacia la simulación de las respuestas al impulso en cada ubicación de oyente, lo cual será necesario para obtener posteriormente los parámetros acústicos de interés a analizar en este trabajo.

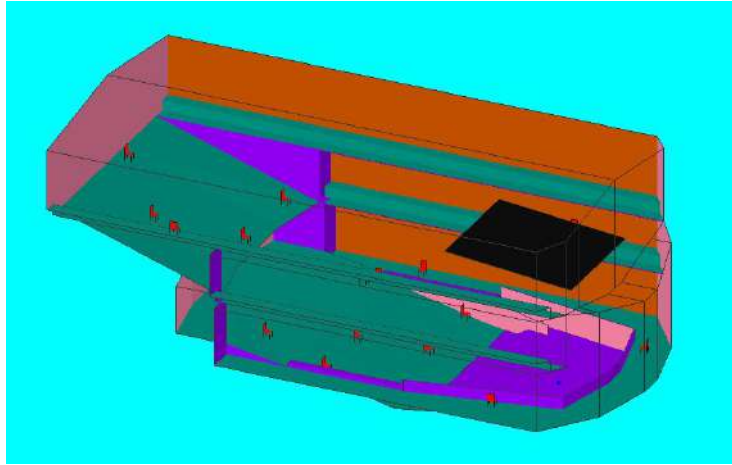


Figure 4: Modelo 3D en EASE, 'vista arquitectónica', donde cada color representa un material diferente.

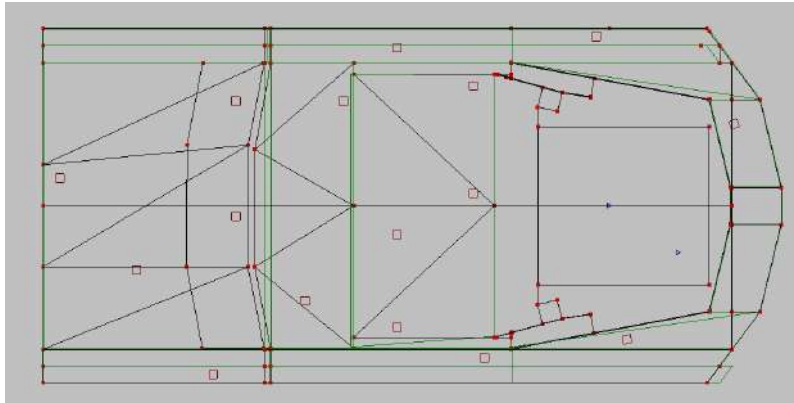


Figure 5: Posiciones de medición ('listener seats') determinadas en EASE.

Mediante la técnica de trazado de rayos (*ray tracing*), EASE permite obtener estas RI sintéticas. Resulta de importancia entonces la correcta y adecuada selección del orden de reflexiones a computar, el tiempo en milisegundos a evaluar y el umbral en donde se dejaron de estimar los rayos ('*Loss*').

Luego de realizar múltiples iteraciones, finalmente se opta por utilizar reflexiones de orden 20, en 709 ms, con 600.000 rayos por parlante, y un umbral de 60 dB, asegurando un 92 % de probabilidad de impacto. En esta configuración, al software le toma un tiempo de procesamiento de 38 minutos por simulación, en promedio, teniendo en cuenta todas las posiciones de medición.

Para esto, resulta de utilidad consultar las recomendaciones en el manual de EASE [3], en donde se recomienda que el *time frame* a utilizar debe ser el resultado de la multiplicación entre el *mean free path time* (0.03 en este auditorio) y el orden de reflexiones (20), obteniendo en este caso aproximadamente 600 ms. Previo a esto, se estaba ejecutando la simulación con un *time frame* de 300 ms como estándar y reflexiones de orden 20, lo que daba problemas en los resultados, ya que, de alguna manera se podría decir que no se estaba dando tiempo, por las dimensiones del auditorio, a que las reflexiones de alto orden lleguen dentro de la ventana de tiempo elegida.

A continuación, se completa con ruido blanco gaussiano la cola de reverberación de las respuestas generadas, asumiendo un proceso estocástico en ese intervalo de la respuesta al impulso (Figura 6). Los parámetros de selección se ajustan hasta obtener un decaimiento energético visualmente acorde a la curva de la respuesta, sumado a las recomendaciones dadas por los desarrolladores del software.

El análisis de estas IR se hace con el software Adobe Audition [2] y el Plugin Aurora [14]. Inicialmente, se tomaron como referencia de comparación los parámetros de RT y EDT provenientes de tres puntos de medición en el sector principal de audiencia, para realizar ajustes generales de los

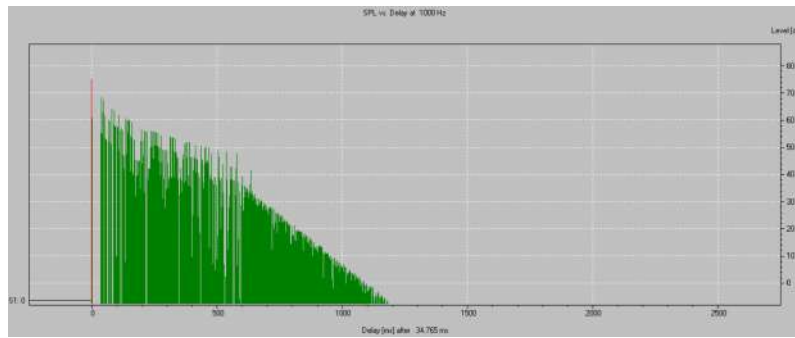


Figure 6: Agregado de la cola estadística ('random tail') a la respuesta al impulso simulada en EASE.

coeficientes de absorción de las superficies en base a ellos. Ya que la primera simulación arrojó diferencias sustanciales con los parámetros reales, se llevó a cabo un proceso iterativo para modelar los coeficientes de absorción y scattering de las superficies con mayor impacto de reflexiones.

Una vez satisfactoriamente próximo el valor simulado de T_{30} al medido, se procedió a realizar una nueva simulación completa, incluyendo todos los puntos de medición previamente determinados. A partir de las respuestas al impulso obtenidas, se obtuvieron los parámetros acústicos solicitados y se realizó su comparación con los medidos.

5. Resultados y Análisis

En el Anexo 2 se visualizan los valores de los coeficientes de absorción y scattering de los diversos materiales implementados en el modelo final. Fueron principalmente basados en referencias[13], los cuales fueron siendo modificados manualmente, con las iteraciones de simulaciones, para ajustarse a las referencias de la medición real.

5.1 T₃₀ y EDT

En las Tablas 2 y 3 se visualizan los valores obtenidos en la simulación, con respecto al T_{30} y EDT , procesados con Aurora. En la Figuras 7 y 8 la curva, en comparación con la medición.

PB hace referencia a 'Planta baja', B a 'Balcones' y R a 'Rampa' (lo que incluye las areas de audiencia de primer piso).

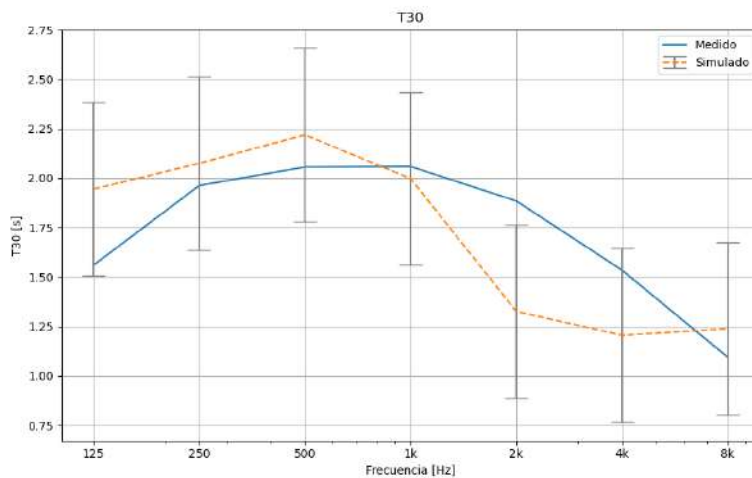
Table 2: Valores obtenidos de T_{30} en la simulación, por zonas de audiencia y diferencias con la medición, en segundos.

	125	250	500	1000	2000	4000	8000
PB	2.054	2.123	2.239	1.828	1.354	1.251	1.206
B	1.953	2.141	2.249	2.022	1.381	1.242	1.270
R	1.826	1.960	2.166	2.142	1.241	1.122	1.238
Promedio	1.944	2.074	2.218	1.997	1.325	1.205	1.238
Medido	1.5598	1.962	2.0555	2.058	1.8838	1.5338	1.094
Dif	0.384	0.112	0.163	-0.061	-0.559	-0.329	0.144
Dif %	24.64%	5.73%	7.92%	-2.96%	-29.66%	-21.44%	13.14%

Tal como se puede observar, si bien la curva del coeficiente T_{30} simulado sigue a grosso modo la tendencia del parámetro medido, se presentan diferencias localizadas pero sustanciales como es el caso de la banda de 2kHz.

Table 3: Valores obtenidos de **EDT** en la simulación, por zonas de audiencia y diferencias con la medición, en segundos.

	125	250	500	1000	2000	4000	8000
PB	2.466	4.486	4.244	1.513	1.318	1.112	0.847
B	3.500	4.326	4.500	1.447	1.269	1.114	0.919
R	3.858	4.776	4.988	1.548	1.369	1.278	1.057
Promedio	3.275	4.529	4.577	1.503	1.319	1.168	0.941
Medido	1.319	1.748	1.830	1.806	1.564	1.294	1.015
Dif	1.956	2.781	2.747	-0.303	-0.246	-0.126	-0.074
Dif %	148.27%	159.10%	150.13%	-16.80%	-15.70%	-9.75%	-7.29%

Figure 7: Comparación de resultados medidos y simulados de T_{30} .

Por otro lado, la curva de *Early Decay Time* (Figura 8), presentó problemas generalizados en las bandas de bajas frecuencias.

Éste comportamiento resultó complejo, dado que la implementación de materiales con mayor coeficiente de absorción o scattering en bajas frecuencias, los cuales podrían contribuir a bajar los tiempos de *EDT*, resultaban en peores valores de T_{30} . Se optó entonces, por optimizar el valor de T_{30} . Cabe aclarar que éste coeficiente fue el más afectado por las variaciones en la cola estadística añadida.

Por otra parte, en lo que al parámetro D_{50} respecta, se puede observar que comparativamente, indica una menor incidencia del sonido directo en bajas frecuencias y el caso opuesto a partir de 500Hz . Ésto indicaría un campo reverberante proporcionalmente más elevado en bajas frecuencias, mientras que en medias-altas es el sonido directo quien predomina.

Comparado a la medición, éste comportamiento simulado indicaría exceso de campo reverberante en bajas frecuencias mientras que falta del mismo para medias-altas.

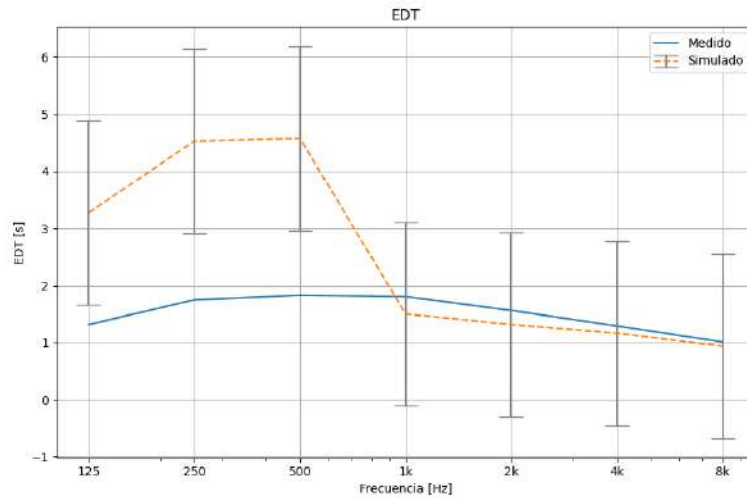


Figure 8: Comparación de resultados medidos y simulados de *Early Decay Time*.

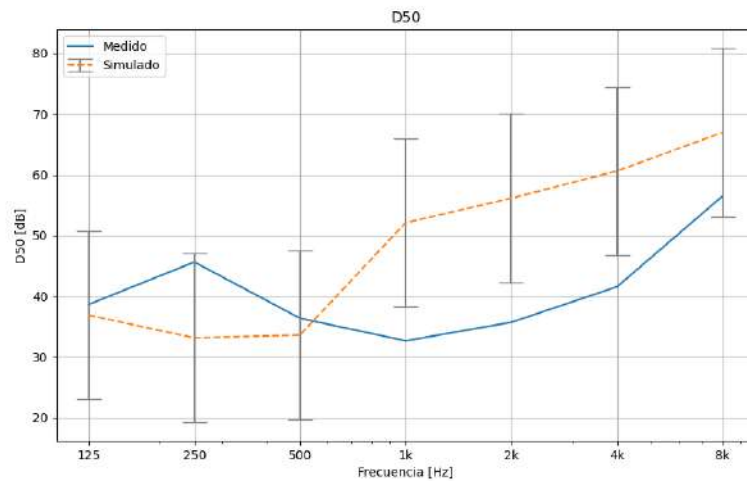


Figure 9: Comparación de resultados medidos y simulados de D_{50} .

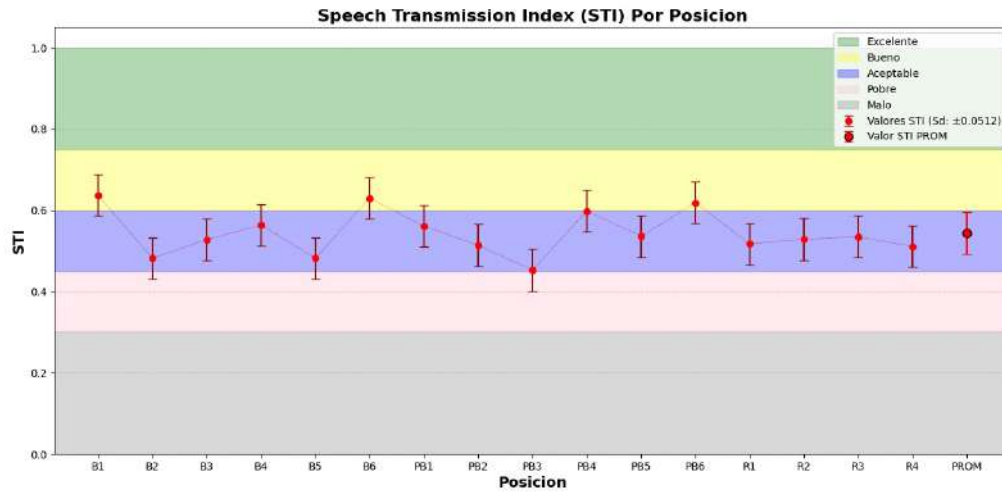
5.2 STI Y ALCONS

En la Tabla 4 se visualizan los valores simulados para caracterizar la inteligibilidad, el *STI* y *%Alcons*, divididos por zonas de audiencia, y la diferencia con el parámetro medido. En la Figura 10 la curva, en comparación con los valores recomendados para un adecuado entendimiento del habla.

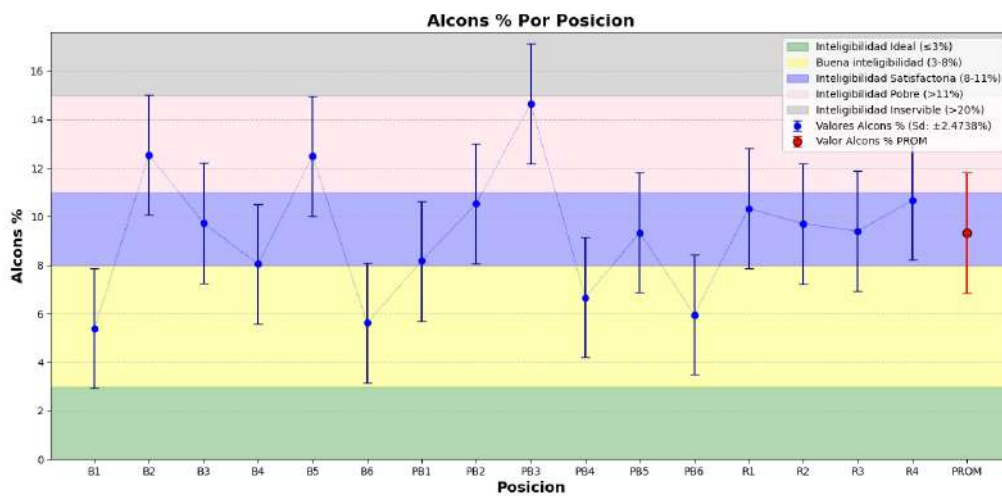
Table 4: *STI* y *%Alcons*, por zona de audiencia y diferencias con los valores medidos.

	B	PB	R	Prom	STI medido	%Alcons medido	Dif	Dif %
STI	0.554	0.547	0.523	0.544	0.480	-	0.0643	13.39%
%Alcons	8.97%	9.22%	10.03%	9.303%	-	12.75%	-3.45%	-27.04%

Los valores arrojados representan una mejor condición en lo que a la inteligibilidad de la palabra respecta para la simulación. Dado que ésta se determina en gran medida por la forma en que un recinto presenta su campo reverberante, éste cambio podría relacionarse con el tiempo de reverberación inferior a lo medido para las bandas medias-altas (Fig. [7]), rango característico para el habla humana.



(a) STI



(b) Alcons

Figure 10: Resultados para el STI y Alcons de la simulación.

5.3 Lateral Fraction

En la Tabla 5 se exhiben los resultados correspondientes al parámetro *Lateral Fraction* (LF) por cada zona de audiencia, en bandas de octava.

Table 5: Lateral Fraction por cada zona de audiencia.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Balcones	0.979	0.911	0.757	0.575	0.598	0.545	0.528
Planta Baja	0.991	0.929	0.721	0.569	0.550	0.519	0.513
1er Piso	1.000	0.951	0.923	0.795	0.787	0.751	0.750
Promedio Total	0.988	0.927	0.780	0.621	0.621	0.581	0.571

Se observa en todos los casos que el LF simulado se encuentra significativamente por encima del recomendado para un auditorio de música sinfónica (rango de 0,20 a 0,25)[15]. Esto se relaciona con la imprecisión de la simulación realizada en cuánto a la relación entre el campo reverberante y el sonido directo. En este caso, el promedio muestra que la mayor cantidad de energía es la proveniente de la dirección lateral.

5.4 Echo Speech y Echo Music

Se visualizan los valores obtenidos para Echo Speech y Echo Music en la Tabla 6, divididos por zona de audiencia y el total.

Table 6: Echo Speech y Echo Music, por zonas de audiencia y total.

	Balcones	Planta Baja	Rampa	Promedio Total
EK (speech)	1.087	1.057	0.905	1.035
EK (music)	1.112	1.092	0.900	1.057

Los valores obtenidos en esta simulación se sitúan en el borde del umbral de reconocimiento audible de ecos para los oyentes. Considerando que el umbral es más alto para la música, alrededor de 1.8, y con un valor de 1 para el discurso (*speech*) según los autores Dietsch y Kraak, se podría decir que bajo estos parámetros, con respecto al habla la sala tiene problemas de eco importantes en las zonas de Balcones y Planta Baja, y un eco potencialmente perceptible en la Rampa. De esta manera, la inteligibilidad del habla podría ser comprometida, lo cual se condice con los resultados simulados del STI, que exhiben un peor comportamiento en balcones que en otras zonas.

Por otro lado, si bien los valores para música son más altos de lo ideal en Balcones y Planta Baja, no alcanzan los umbrales de "claramente molesto" para la música clásica (1.8) o música más densa. La zona de la Rampa se comporta muy bien para la música. Es decir, los ecos, si bien existen, serían mucho menos disruptivos para la música que para el habla.

5.5 Mapeos

Para evaluar la evolución de los parámetros en el espacio, se realizó el mapeo de los mismos. Partiendo con el SPL directo [11], se puede observar una distribución esperable en las zonas de audiencia principales, mientras que en los balcones la incidencia resulta a través de la cara inferior del área de audiencia designada, resultando en que el software no reconozca su aporte energético.

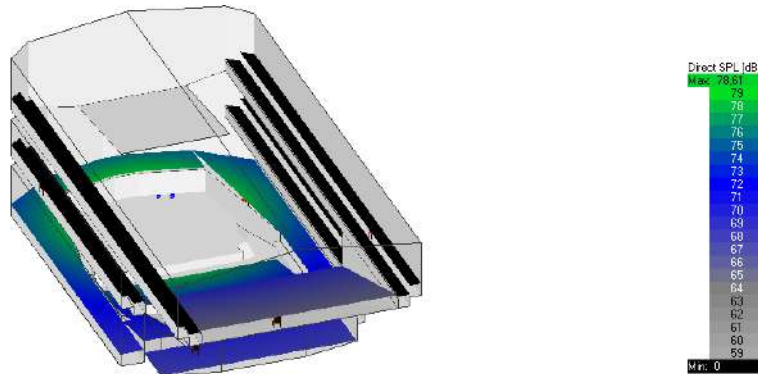


Figure 11: Mapeo de SPL directo.

Luego, en el caso del parámetro D/R (Figura [12]), se puede observar también un comportamiento acorde. Las zonas más oscuras representan un mayor aporte energético de las reflexiones que del campo directo, explicando dicha coloración en las zonas más cercanas a paredes y lejanas al escenario.

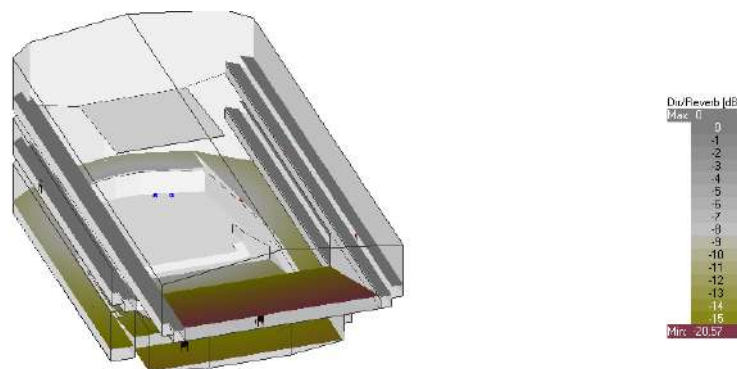


Figure 12: Mapeo de D/R .

Por último, se representaron los parámetros $\%AlCons$ [13] y STI [14]. De manera similar a lo ocurrido con el mapeo de SPL , al no detectar campo directo, se presenta una pérdida de consonantes y de transmisión del habla absoluta para el caso de los balcones. Ambos hechos se atribuyen a un error de simulación y/o representación geométrica.

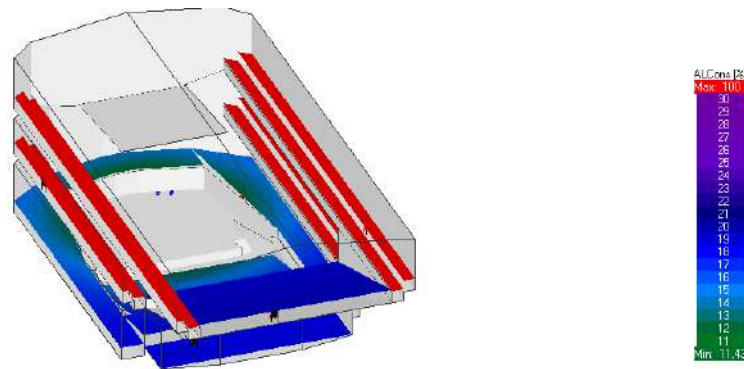


Figure 13: Mapeo de %AlCons.

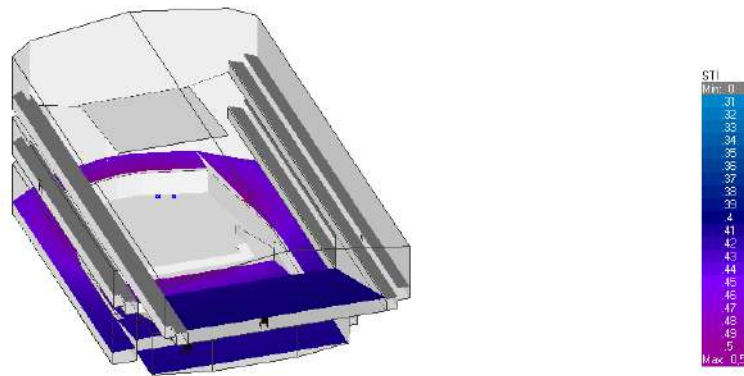


Figure 14: Mapeo de STI.

6. Conclusiones

La simulación acústica del auditorio sinfónico de la Usina del Arte mediante el software EASE permitió explorar las capacidades y limitaciones de los métodos basados en acústica geométrica para modelar recintos reales complejos. A lo largo del trabajo, se construyó un modelo tridimensional del recinto, se asignaron propiedades acústicas a las superficies y se realizaron simulaciones detalladas para obtener parámetros acústicos fundamentales. Estos fueron posteriormente comparados con mediciones reales obtenidas del repositorio OpenAIR.

Los resultados, particularmente aquellos en las bandas inferiores de frecuencias, distaron considerablemente de aquellos obtenidos mediante mediciones. Las dificultades a la hora de ajustar el modelo tridimensional a modo de que se integre de manera apropiada con el software EASE, y particularmente la metodología poco precisa de procesamiento de la cola estadística de las respuestas al impulso generadas, resultaron en que los ajustes sobre los parámetros acústicos de las superficies no se trasladaran de manera directa ni predecible sobre los parámetros finales obtenidos de las mismas. Mas aún, dos colas estadísticas visualmente similares añadidas al mismo reflectograma resultaron en parámetros acústicos notoriamente distintos.

Por otro lado, si bien fue posible hacerse con las respuestas al impulso medidas, no se contó con suficiente información sobre su distribución en el recinto al momento de la medición, lo que dificultó la comparación directa entre respuestas simuladas y medidas.

En definitiva, a pesar de las numerosas iteraciones de ajuste (más de 25), en general los valores obtenidos no resultaron lo suficientemente confiables como para realizar una representación adecuada de la sala. El modelo desarrollado en EASE no alcanzó una fidelidad suficiente como para ser considerado una herramienta predictiva confiable para el diseño o ajuste acústico de este tipo de recintos. Sin embargo, el proceso fue valioso como ejercicio formativo en simulación acústica, permitiendo identificar los principales desafíos metodológicos y técnicos que deben abordarse.

References

- [1] *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2009.
- [2] Adobe Systems Incorporated. *Adobe Audition 3.0*. Software de edición, grabación y análisis de audio multipista. 2007. URL: <https://www.adobe.com/products/audition.html>.
- [3] AFMG Technologies GmbH. *EASE 4.3 User's Guide*. AFMG Ahnert Feistel Media Group. AFMG Technologies GmbH. Berlin, Germany, 2008.
- [4] J. B. Allen and D. A. Berkley. “Image method for efficiently simulating small-room acoustics”. In: *Journal of the Acoustical Society of America* (1978).
- [5] Y. Ando. *Concert Hall Acoustics*. Springer-Verlag, 1985.
- [6] H. Autio and M. Nilsson. “A Non-Uniform Energy Distribution Model for Sound Diffusion Simulation”. In: *[Fuente no especificada, agregar si tenés]* (Año no especificado).
- [7] H. Autio, N. Vardaxis, and D. Hagberg. “An Iterative Ray Tracing Algorithm to Increase Simulation Speed While Maintaining Overall Precision”. In: *Acoustics 5.1* (2023), pp. 320–342. DOI: 10.3390/acoustics5010019.
- [8] Michael Barron and L. Marshall. “Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: The derivation of a physical measure”. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 69.5 (1981), pp. 1346–1353. DOI: 10.1121/1.385788.
- [9] Gustavo Jorge Basso. *Incremento de la calidad sonora en salas para música a partir de la configuración del campo acústico temprano*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de La Plata. Director: Dr. Daniel Belinche. Lugar de trabajo: IPEAL. 2017. URL: https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/62712/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y (visited on 05/25/2025).
- [10] N. Borrel-Jensen et al. “Sound propagation in realistic interactive 3D scenes with parameterized sources using deep neural operators”. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 121.2 (2023). DOI: 10.1073/pnas.2312159120.
- [11] F. Brinkmann et al. “A benchmark for room acoustical simulation. Concept and database”. In: *Applied Acoustics* 176 (2021), p. 107867. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107867.
- [12] F. Brinkmann et al. “A round robin on room acoustical simulation and auralization”. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 145.4 (2019), pp. 2746–2760. DOI: 10.1121/1.5096178.
- [13] Trevor J. Cox and Peter D’Antonio. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. 2nd. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. ISBN: 9780415471745.
- [14] Angelo Farina. *Aurora: Plug-ins for Acoustic Analysis*. Conjunto de complementos para análisis acústico impulsivo y convolucional en Adobe Audition. 2001. URL: <http://www.angelofarina.it/Aurora/Aurora.htm>.
- [15] Anders C. Gade. “Subjective and Objective Room Acoustic Parameters”. In: *Springer Handbook of Acoustics*. Ed. by Thomas D. Rossing. Springer, 2007, pp. 306–313. DOI: 10.1007/978-0-387-30425-0_12.
- [16] Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. *Usina del Arte*. Ficha técnica del espacio cultural, La Boca. n.d. URL: <https://baespacios.buenosaires.gob.ar/contenido/67593-usina-del-arte> (visited on 05/25/2025).

-
- [17] A. Kulowski. “Algorithmic representation of the ray tracing technique”. In: *Applied Acoustics* (1984).
- [18] H. Llopis, C. Jeong, and A. Engsig-Karup. “Reduced order modelling using parameterized nonuniform boundary conditions in room acoustic simulations”. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 153 (2023), p. 2506. DOI: 10.1121/10.0017720.
- [19] M. J. Mahjoob and S. Malakooti. “Acoustic simulation of building spaces by ray-tracing method: prediction vs. experimental results”. In: *Noise, Vibration and Acoustics Research Center* (2008).
- [20] A. Neidhardt, C. Schneiderwind, and F. Klein. “Perceptual Matching of Room Acoustics for Auditory Augmented Reality in Small Rooms - Literature Review and Theoretical Framework”. In: *Trends in Hearing* (2022). DOI: 10.1177/23312165221092919.
- [21] OpenAIR Project. *OpenAIR – Open Acoustic Impulse Response Library*. n.d. URL: <https://www.openair.hosted.york.ac.uk> (visited on 05/25/2025).
- [22] T. Otsuru et al. “Large-scale finite element sound field analysis of rooms using a practical boundary modeling technique”. In: *Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration (ICSV)*. 2012.
- [23] P. H. Parkin and J. H. Taylor. “Speech reinforcement in St. Paul’s Cathedral, London”. In: *The Acoustics Bulletin* (1952). Introduced the concept of direct-to-reverberant ratio (D/R).
- [24] V. M. A. Peutz. “Articulation loss of consonants as a criterion for the evaluation of acoustical conditions in public buildings”. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 51.1B (1971), S1–S1. DOI: 10.1121/1.1912839.
- [25] Rassegna. *Zeta 2 Curva*. Accedido el 25 de mayo de 2025. 2025. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=pLWMZHUKHkc>.
- [26] Rassegna. *Zeta 2 Curva*. <https://www.rassegna.com.ar/producto/zeta-2-curva/>. Accedido el 25 de mayo de 2025. n.d.
- [27] J. H. Rindel. “The use of computer modeling in room acoustics”. In: *Journal of Vibroengineering* (2000).
- [28] Leandro Rodiño, Alejandro Bidondo, and Nahuel Cacavelos. “Acoustic Characterization of the Usina del Arte Symphony Hall”. In: *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics (ICA 2016)*. Buenos Aires, Argentina, 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/307967316_Acoustic_characterization_of_the_Usina_del_Arte_Symphony_Hall (visited on 05/25/2025).
- [29] Leandro Rodiño, Alejandro Bidondo, and Nahuel Cacavelos. *Usina del Arte Symphony Hall*. Mediciones realizadas según ISO 3382. Incluye respuestas impulsivas y parámetros acústicos. 2014. URL: https://www.openair.hosted.york.ac.uk/?page_id=770 (visited on 05/25/2025).
- [30] Y. Ye and Q. Fu. “Studies on the accuracy of acoustic simulation based on EASE software”. In: *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing*. 2014.
- [31] H. Zhang and W. Wang. “Efficient sound modeling for acoustic monitoring in complex temperature and wind fields”. In: *Applied Acoustics* 216 (2024), p. 109760. DOI: 10.1016/j.apacoust.2023.109760.
-

A. Anexo 1 - Fotografías Auditorio Usina del Arte



Figure 15: Sala sinfónica vacía, vista desde el escenario.



Figure 16: Sala sinfónica vacía, vista desde el balcón.

B. Anexo 2: Coeficientes de Absorción

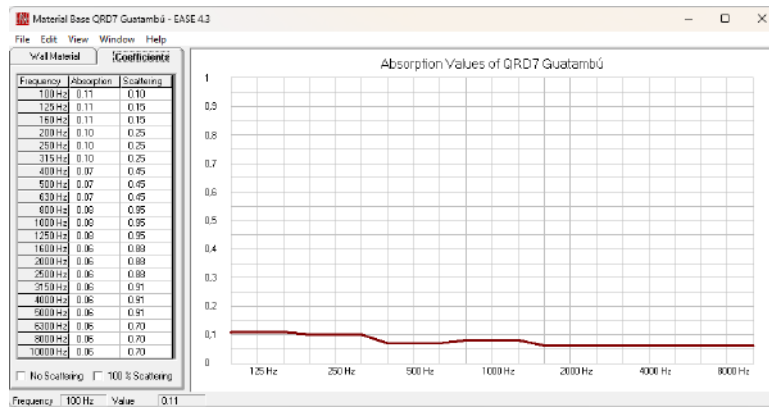


Figure 17: Valores del coeficiente de absorción por frecuencia de los difusores QRD7.

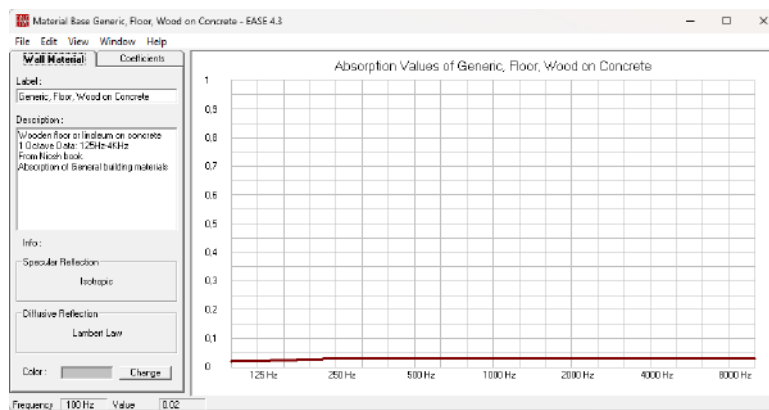


Figure 18: Valores del coeficiente de absorción por frecuencia del piso de madera.

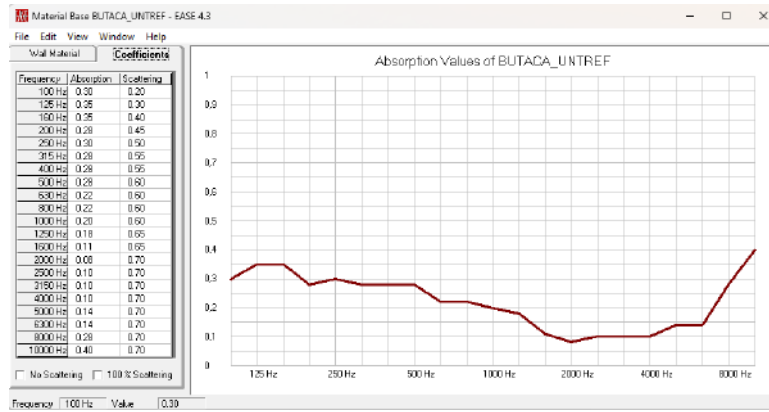


Figure 19: Valores del coeficiente de absorción por frecuencia de las butacas.

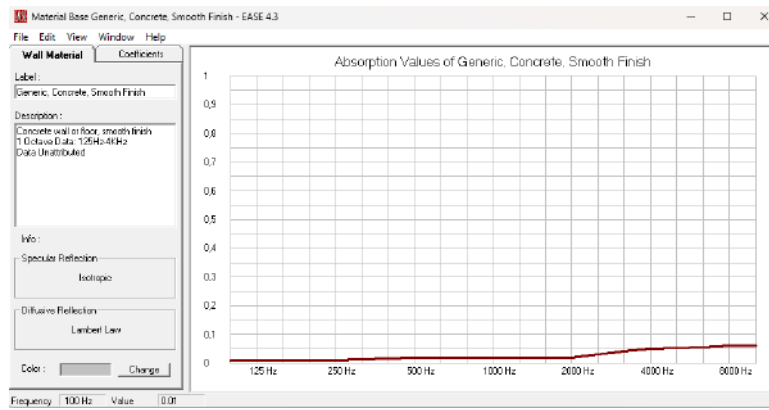


Figure 20: Valores del coeficiente de absorción por frecuencia de las paredes de cemento.

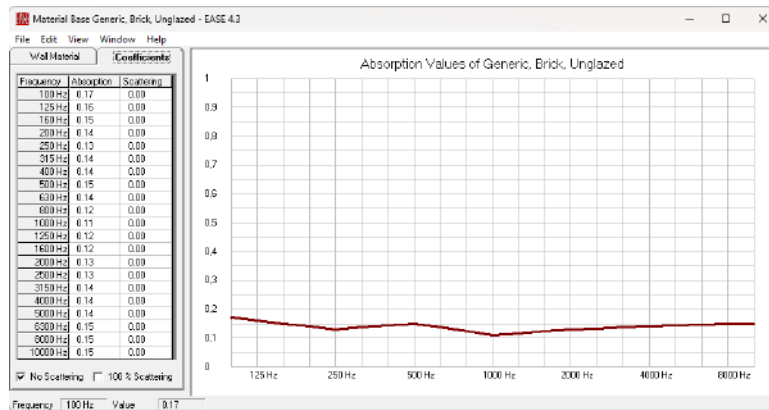


Figure 21: Valores del coeficiente de absorción por frecuencia de las paredes de ladrillo.

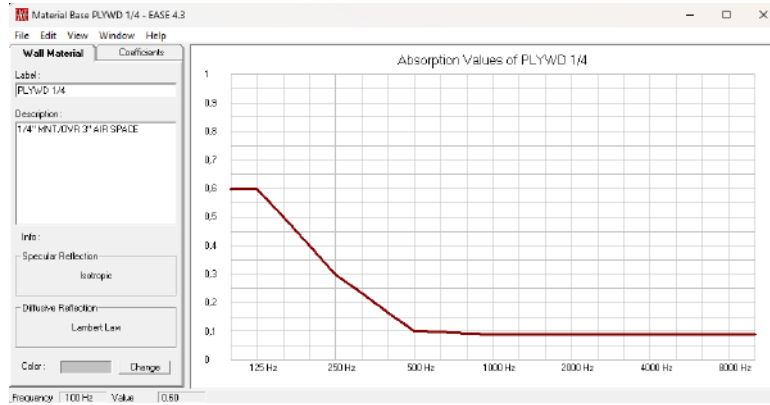


Figure 22: Valores del coeficiente de absorción por frecuencia del fenólico.

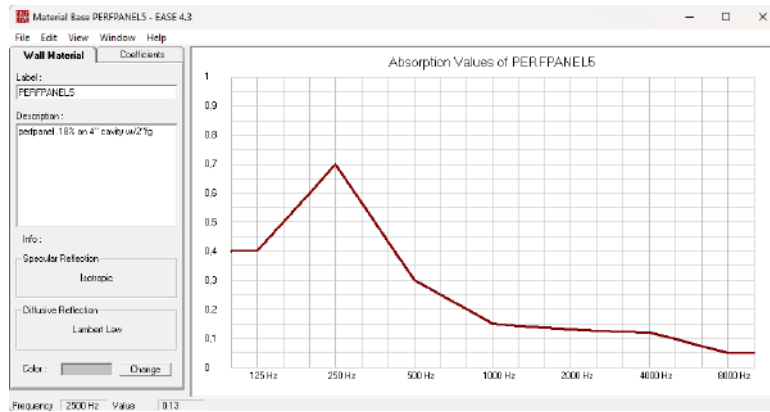


Figure 23: Valores del coeficiente de absorción por frecuencia del panel perforado de 4 pulgadas de los balcones.

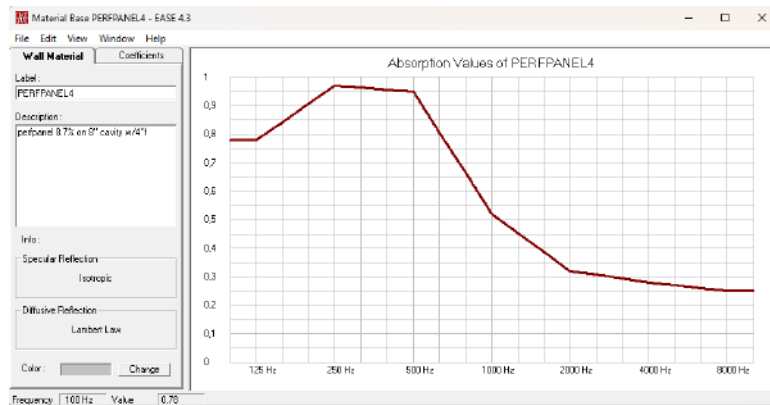


Figure 24: Valores del coeficiente de absorción por frecuencia del panel perforado de 8 pulgadas de los balcones.

C. Cuestionario

C.1 ¿Cuántos rayos utilizaron y por qué?

Se configuró la simulación para que arroje 600.000 rayos por altoparlante. Ésto fue a modo de garantizar una probabilidad de impacto mayor al 90%, y con ello una apropiada representación del recinto.

C.2 ¿En cuántas posiciones del escenario colocaron la fuente omnidireccional? ¿Por qué?

Si bien la norma especifica al menos dos posiciones, los problemas relacionados a tiempos de cómputo encontrados durante la simulación llevaron a utilizar una única fuente a modo de agilizar el proceso de ajuste.

C.3 ¿Por qué hay diferencia entre el cálculo estadístico de la reverberación y el valor de la reverberación que presentan las RIRs?

El añadido de la cola estadística a las respuestas al impulso generadas por el software resulta un tanto rudimentario, dado que su ajuste es principalmente visual y no sigue criterios preestablecidos. Además, leves variaciones tanto en el posicionamiento temporal, como la ganancia y densidad de pulsos de la cola estadística resultan en parámetros finales notoriamente distintos, dificultando un apropiado análisis de los mismos.

C.4 Planteamiento de una pregunta de investigación clara, no resuelta y abordable experimentalmente.

¿Qué relación existe entre las características modificables de la cola estadística ('random tail') agregada a la respuesta al impulso y su efecto sobre el resultado de los parámetros acústicos calculados a partir de esta? ¿Hay una única forma correcta de aplicarla?