

Evaluación de modelos acústicos del Teatro Nacional de Costa Rica: hacia un diseño mejorado de concha acústica

Assessment of acoustic models of the National Theater of Costa Rica: towards an improved acoustic shell design

Joan Alfaro-Zamora¹, Jose Pablo Bulgarelli-Bolaños², Natalia Murillo-Quirós³

Alfaro-Zamora, J; Bulgarelli-Bolaños, J.P; Murillo-Quirós, N
Evaluación de modelos acústicos del Teatro Nacional de Costa Rica: hacia un diseño mejorado de concha acústica.
Tecnología en Marcha. Vol. 38, N° especial. Octubre, 2025.
Escuela de Arquitectura y Urbanismo. TEC. Pág. 59-71.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i7.8290>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica
✉ joan.az@estudiantec.cr
ID <https://orcid.org/0009-0004-3588-2856>

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica
✉ jpbulgarelli@itcr.ac.cr
ID <https://orcid.org/0000-0001-5476-6544>

3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica
✉ nmurillo@itcr.ac.cr
ID <https://orcid.org/0000-0002-6777-1622>



Palabras clave

Parámetros acústicos; simulación; sonido; reverberación; coeficiente de absorción.

Resumen

El objetivo del trabajo, que se presenta a continuación, fue comparar los resultados de modelos acústicos simulados en COMSOL Multiphysics para el Escenario y la Gran Sala del Teatro Nacional de Costa Rica (TNCR) con los parámetros medidos en el sitio y proponer mejoras de las condiciones acústicas actuales. El escenario del TNCR cuenta con una concha acústica como mecanismo teatral para espectáculos musicales en vivo, esta investigación evaluó los parámetros acústicos mediante simulaciones basadas en tres modelos CAD: sin concha acústica, con la concha acústica que actualmente tiene el TNCR y con una propuesta alternativa de concha acústica. La metodología incluyó la simulación de la distribución del sonido y el cálculo de los parámetros acústicos T20, EDT, C80 y D50. Los resultados de los modelos con y sin concha se compararon con los valores medidos. La propuesta de concha acústica se comparó para determinar su impacto en los parámetros. Los resultados mostraron que los valores de T20 y EDT tendieron a sobreestimarse, especialmente en bajas frecuencias, mientras que C80 y D50 mostraron concordancia con los valores medidos. La propuesta de concha acústica incrementó T20 y EDT sin alterar en gran medida C80 y D50. Sin embargo, aunque el T20 aumentó, permaneció debajo del rango recomendado de 1,4 s a 1,8 s. Para trabajos a futuros se recomienda generar nuevas simulaciones con diferentes materiales que reflejen aún más el sonido y con diferentes geometrías de la concha acústica que dirijan el sonido de forma más directa al público.

Keywords

Acoustic parameters; simulation; sound; reverberation; absorption coefficient.

Abstract

The objective of this work, shared in this communication, was to compare the results of acoustic models simulated in COMSOL Multiphysics for the Stage and the Great Hall of the National Theater of Costa Rica (TNCR) with the parameters measured on-site and to propose improvements to the current acoustic conditions. The TNCR stage has an acoustic shell that is placed for live musical performances. This research evaluated the acoustic parameters through simulations based on three CAD models: without acoustic shell, with the acoustic shell that the TNCR currently has, and with an alternative acoustic shell proposal. The methodology included simulation of the sound distribution and calculation of the acoustic parameters T20, EDT, C80 and D50. The results of the models with and without shell were compared with measured values. The proposed acoustic shell was compared to determine its impact on the parameters. The results showed that the values of T20 and EDT tended to be overestimated, especially at low frequencies, while C80 and D50 showed agreement with the measured values. The proposed acoustic shell increased T20 and EDT without greatly altering C80 and D50. However, although T20 increased, it remained below the recommended range of 1.4 s to 1.8 s. As future work, new simulations should be run with different materials that reflect the sound even more and with different geometries that direct the sound more directly to the audience.

Introducción

En el presente artículo se publica parte de los resultados del Trabajo Final de Graduación (TFG) para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Física, del estudiante Joan Alfaro Zamora, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Dicho TFG está vinculado con el proyecto de investigación “Gemelo Digital como herramienta para la gestión de planes de conservación programada. Caso de estudio: foyer y fumadores del Teatro Nacional de Costa Rica”, inscrito ante la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y coordinado por la Escuela de Arquitectura y Urbanismo. Dicha vinculación permitió conocer el comportamiento del objeto de estudio ante variables que no están contempladas en el planeamiento inicial de la investigación, pero que facilita el desarrollo de los proyectos planteados en la ruta de investigación.

El Teatro Nacional de Costa Rica (TNCR) cuenta con una concha acústica retráctil que se coloca sobre el escenario para mejorar la proyección del sonido sobre la Gran Sala cuando se realizan eventos musicales. Esta concha acústica fue construida en la década de 1960, y a pesar de que se sigue utilizando, se fabricó sin seguir los estándares constructivos para este tipo de dispositivos teatrales. Además, el Departamento de Conservación y el Departamento de Operaciones y Servicios ha recibido observaciones de parte de músicos que sugieren que las condiciones acústicas del TNCR pueden mejorar.

Este trabajo utilizó simulaciones como método principal para analizar la acústica del lugar, con diferentes configuraciones de la concha. El análisis se basó en la norma ISO 3382-1:2009, la cual busca estandarizar el procedimiento de medición de parámetros acústicos en un recinto y define cuáles variables se recomiendan medir. Con base en esta norma, se decidió utilizar los parámetros de Tiempo de Reverberación (T20), Tiempo de reverberación temprano (EDT por sus siglas en inglés), Claridad (C80) y Definición (D50). Todas estas variables se analizaron para diferentes valores de frecuencia: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz y 8000 Hz. Con el fin de guiar al lector se describen los parámetros acústicos que se usaron para las simulaciones.

Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación es el tiempo que tarda un sonido en decaer 60 dB una vez es emitido de la fuente. Se representa comúnmente con la letra T, y utiliza este valor porque se considera que así se obtiene el tiempo que tarda en decaer un sonido fuerte a un nivel que ya no es perceptible por el oído humano [1]. Se expresa en segundos y para salas de un tamaño comparable al TNCR, se recomienda un valor de entre 1,4 s y 1,8 s cuando el contenido musical predomina [2].

Cuando en el recinto analizado se complica obtener un decaimiento de 60 dB, es posible obtener el tiempo de reverberación a partir de otros valores (se utiliza comúnmente 20 dB y 30 dB). En estos casos, se utiliza el tiempo obtenido de estos valores para extrapolar el tiempo que se obtendría para los 60 dB. Cuando el tiempo de reverberación se obtiene de extrapolar un decaimiento de 20 dB, se representa como T20, y cuando el decaimiento es de 30 dB como T30 [1].

Tiempo de reverberación temprano

El tiempo de reverberación temprano o Early Decay Time (EDT), es una representación del tiempo de reverberación percibido por las personas, ya que toma en cuenta sólo los valores más altos de sonido, los cuales son los más fácilmente percibidos por el oído humano. Este se calcula utilizando únicamente la caída de los primeros 10 dB de un sonido para extrapolar el tiempo de reverberación. También se expresa en segundos, y su rango típico va de 1 s a 3 s [1].

Claridad

La claridad es un parámetro que relaciona la energía de los primeros instantes del sonido con la energía después de pasado un tiempo determinado. Se utilizan los primeros 50 ms para la claridad de la voz y los primeros 80 ms para la claridad musical. En este caso, interesa principalmente la segunda, debido a que la concha acústica del TNCR se utiliza únicamente para eventos musicales. Su valor se expresa en dB, y su rango típico va de -5 dB a 5 dB [1][3].

Definición

La definición es un parámetro que se obtiene a partir de la claridad de la voz, y funciona para estudiar la claridad en la percepción del sonido. Es una métrica adimensional, expresada como un valor entre 0 y 1, su rango típico va de 0,3 a 0,7; e indica una proporción de energía temprana con respecto a la energía total en el tiempo de reverberación. Valores altos indican que gran parte de la energía llega en los primeros instantes después de emitido el sonido, mientras que valores bajos indican que la energía se distribuye en tiempos más largos. Este segundo caso es preferible cuando la parte musical predomina sobre la voz [1].

Diferencia apenas perceptible

Todos los parámetros acústicos cuentan con un valor conocido como diferencia apenas perceptible o *Just Noticeable Difference* (JND). Este valor representa el cambio mínimo necesario que debe haber en el parámetro para que este sea perceptible por el oído humano. En el cuadro 1 se muestran los valores de JND de las medidas estudiadas. Además, es común utilizar tres veces este valor ($3 \times \text{JND}$) como límite para asegurar que el cambio sea perceptible.

Cuadro 1. Rango típico y JND de los parámetros T20, EDT, C80 y D50 definidos en la norma ISO 3382-1:2009 [1].

Parámetro acústico	JND	Rango típico
T20/EDT	Rel. 5%	1,0 s a 3,0 s
Claridad C80	1 dB	-5 dB a 5 dB
Definición D50	0,05	0,3 a 0,7

Respecto a la simulación acústica

La simulación acústica de un recinto se realiza cuando se quiere estudiar el comportamiento del sonido en el lugar sin hacer mediciones en el sitio. Esto permite, entre otras aplicaciones, el cálculo de parámetros acústicos. Para esto, se necesita de un modelo CAD simplificado del lugar, así como información de los materiales que más predominan, tales como el de las paredes, pisos, cielos, o el de los asientos. Es especialmente útil cuando se quieren estudiar diferentes configuraciones en un recinto sin necesidad de construirlas físicamente [4].

Para este trabajo, se utiliza COMSOL *Multiphysics* como software de simulación, el cual emplea un método de trazado de rayos para modelar la distribución del sonido en el lugar. Este software es utilizado para modelar múltiples escenarios físicos, donde el apartado de acústica es solo uno de ellos [5][6]. Un detalle para tomar en cuenta es que los algoritmos empleados para calcular parámetros acústicos a partir de simulaciones tienden a sobreestimar los valores de tiempo de reverberación y de EDT, principalmente en frecuencias bajas [7].

Materiales y métodos

Para llevar a cabo la simulación se utilizó como base un modelo CAD de la zona del Escenario y la Gran Sala del TNCR, contemplando únicamente los cerramientos perimetrales de estos espacios. Para esto, se simplificó el modelo facilitado por el Departamento de Conservación del Teatro, de forma que se llegó a una geometría tridimensional como se muestra en las Figuras 1 y 2. La simplificación de este modelo se hizo directamente a través del software COMSOL *Multiphysics*.

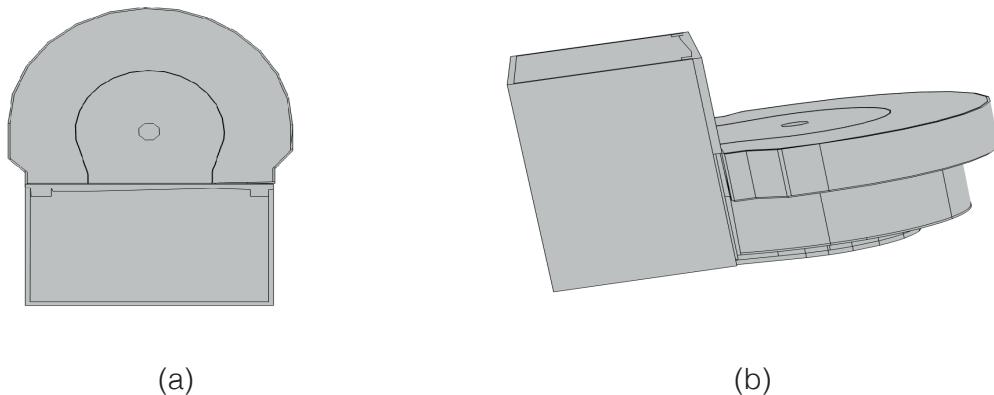


Figura 1. Parte externa de modelo CAD simplificado del Escenario y Gran Sala del TNCR utilizado para la simulación, (a) vista superior, (b) vista isométrica

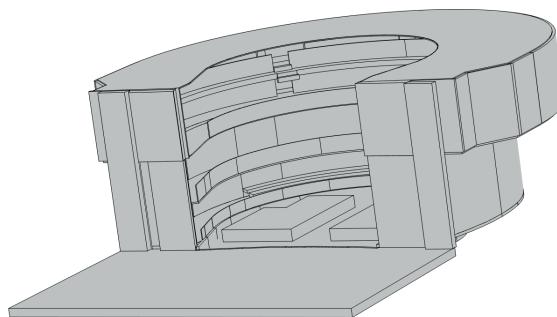


Figura 2. Vista al interior del modelo CAD simplificado desde el Escenario hacia la Gran Sala del TNCR utilizado para la simulación.

Una vez hecha la simplificación, se le asignó al modelo CAD el material más predominante a las superficies del Escenario y la Gran Sala, con base en los materiales reales del lugar. En principio, se utilizaron tres materiales diferentes para la simulación: madera, ladrillo, y un material genérico para los asientos. En la Figura 3, se muestran en azul las superficies donde se asignó ladrillo como material. A las demás superficies, se les asignó el material de madera.

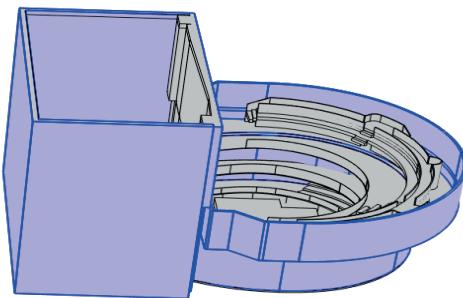


Figura 3. Modelo CAD del Escenario y Gran Sala del TNCR con las superficies a las que se les asignó ladrillo como material señaladas en azul.

Después se procedió con el mallado del modelo CAD. El mallado se utiliza para dividir la geometría del modelo en figuras geométricas más pequeñas, las cuales contienen todas las características necesarias para resolver las ecuaciones físicas que aproximan el comportamiento del sonido dentro del software. Para las simulaciones realizadas en este trabajo, se utilizó un mallado basado en triángulos de un tamaño regular, tal como se muestra en la Figura 4. Cuanto más fino sea el mallado más recursos computacionales se necesitarán para correr la simulación. Con esta configuración se corrió el modelo para determinar las variables acústicas en el TNCR.

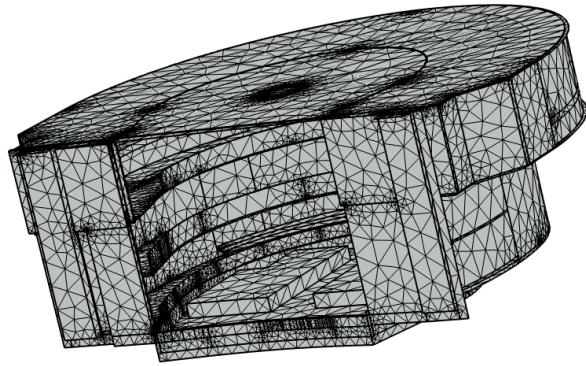


Figura 4. División de la geometría en el CAD del Escenario y Gran Sala del TNCR resultado del mallado aplicado.

Para contar con valores con los cuales comparar los resultados de la simulación, se realizaron medidas directas de sonido en el TNCR. Se utilizaron globos de 12 pulgadas como fuente de sonido en dos puntos del escenario, así como 10 puntos de medición distribuidos en diferentes zonas de butacas; además, se hicieron mediciones de la curva de decaimiento del sonido y con ella se calcularon los parámetros acústicos T20, EDT, C80 y D50 utilizando un sonómetro 3M SoundPro SE/DL. En total se obtuvieron 120 medidas, 60 con concha acústica y 60 sin ella. Los parámetros fueron calculados a partir de las curvas de decaimiento siguiendo los procedimientos descritos en la norma ISO 3382-1:2009 [1].

Como parte del análisis, se utilizaron además otros dos modelos CAD, uno con la concha acústica con la que el TNCR cuenta actualmente y otro con una propuesta de concha acústica. Para esta última, se agregaron paredes de madera alrededor la concha actual de forma tal que se terminara de cerrar el espacio, con el objetivo de analizar si de esta manera mejoran los parámetros acústicos del lugar. Los modelos CAD resultantes se pueden ver en las figuras 5 y 6 respectivamente, en ambos casos el material asignado para las conchas fue madera, igual

que la concha actual del TNCR. La propuesta de concha acústica no se aleja mucho de la que existe pues sería fácil de implementar si da buenos resultados, por limitaciones de tiempo en la ejecución de este estudio no se exploran otras posibles geometrías.

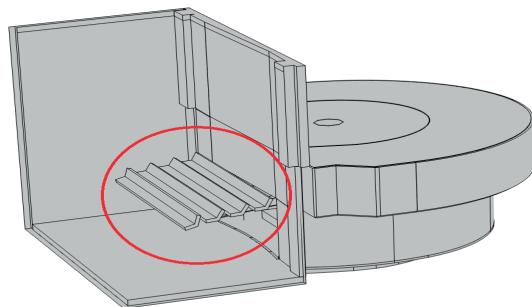


Figura 5. Modelo CAD del Escenario y Gran Sala del TNCR con la concha acústica actual señalada en rojo.

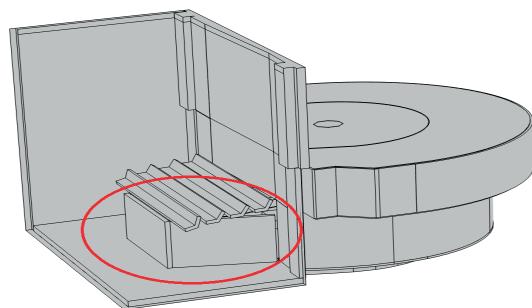


Figura 6. Modelo CAD del Escenario y Gran Sala del TNCR con la concha acústica modificada (paredes señaladas en rojo permiten cerrar más el espacio).

Los resultados obtenidos en los tres modelos utilizados para este trabajo se compararon entre sí y con valores de parámetros acústicos del lugar ya conocidos por medio de la medición.

Resultados

Uno de los resultados de la simulación fue un modelo de distribución del sonido en el Escenario y Gran Sala del TNCR (ver Figura 7), en el cual se muestra cómo se distribuye dicho sonido para diferentes valores de tiempo; además en este modelo se grafica cómo el sonido ya se ha distribuido en toda la zona de el escenario y está por llegar hasta las butacas traseras, en un tiempo de 0,07 segundos.

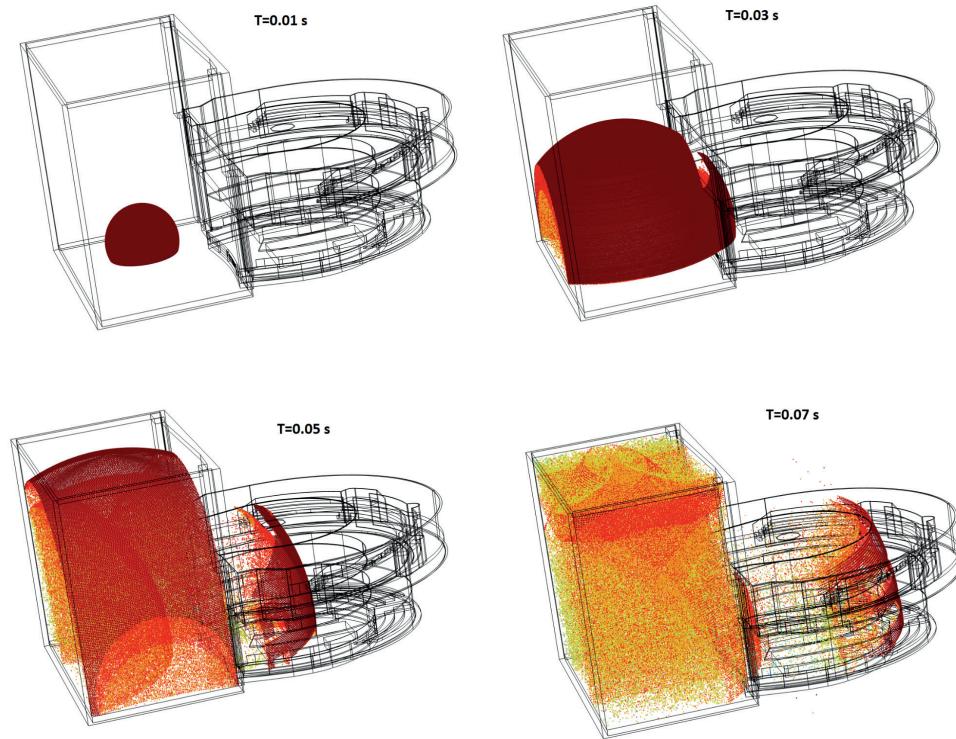


Figura 7. Modelo de la distribución del sonido en el Escenario y Gran Sala del TNCR.

A partir de esta distribución, el software calculó los parámetros acústicos T20, EDT, C80 y D50. Se compararon los valores medidos en el TNCR con y sin concha acústica, con los obtenidos por medio de la simulación, estos valores se resumen en el cuadro 2. Los resultados resumidos de los parámetros acústicos obtenidos para el modelo sin concha acústica se muestran en la Figura 8.

Cuadro 2. Parámetros acústicos en el Escenario y Gran Sala del TNCR
ya conocidos a partir de mediciones en el sitio.

Frecuencia (Hz)	Sin concha acústica				Con concha acústica			
	T20 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	D50	T20 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	D50
125	1,2533	1,2724	1,6373	0,4300	1,1982	1,2070	1,8494	0,4403
250	1,0218	1,0478	2,9860	0,4956	1,0814	1,0911	2,5560	0,4747
500	0,9285	0,9372	3,6794	0,5288	0,9723	0,9782	3,3360	0,5124
1000	1,0237	1,0253	2,9474	0,4937	1,0497	1,0557	2,7464	0,4840
2000	0,9437	0,9449	3,4882	0,5197	0,9845	0,9870	3,1788	0,5049
4000	1,1252	1,1275	2,2414	0,4594	1,1572	1,1594	2,0493	0,4500
8000	1,3415	1,3553	1,0930	0,4036	1,3655	1,3661	0,9810	0,3982

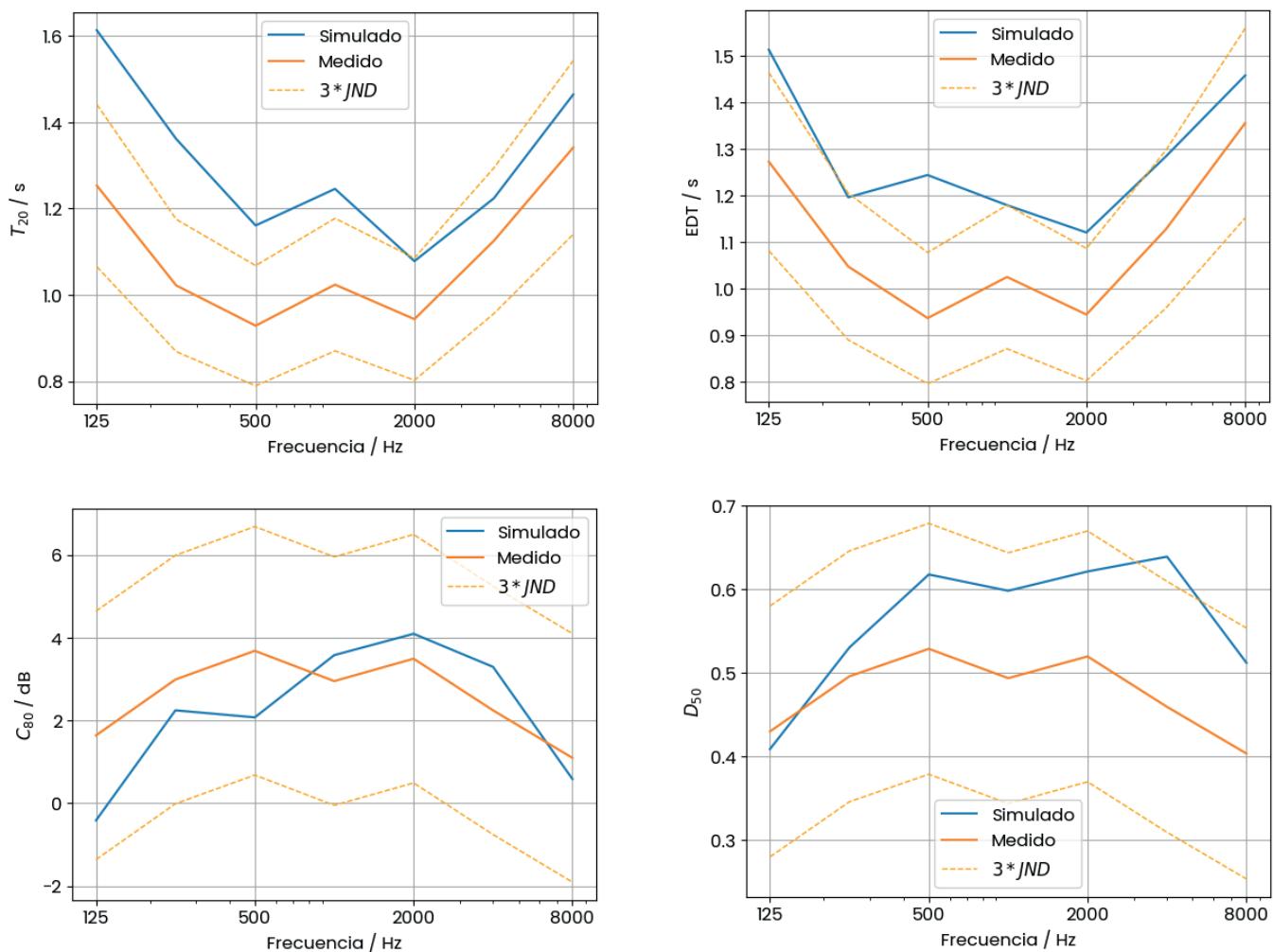


Figura 8. Gráficas resumen de los parámetros acústicos obtenidos de la simulación para el modelo sin concha acústica.

En las gráficas de la Figura 8, se observa como los parámetros de T_{20} y EDT tienden a sobreestimarse, principalmente para las frecuencias más bajas. Los parámetros C_{80} y D_{50} tienen un comportamiento más cercano a los medidos en el sitio. Como ya se mencionó anteriormente, es común que los parámetros T_{20} y EDT sean sobreestimados por los algoritmos que hacen el cálculo a través de simulación, por lo que no es de extrañar que ocurra también para este caso [7]. Para el modelo con la concha acústica actual, se muestra un resumen de los resultados en las gráficas de la Figura 9.

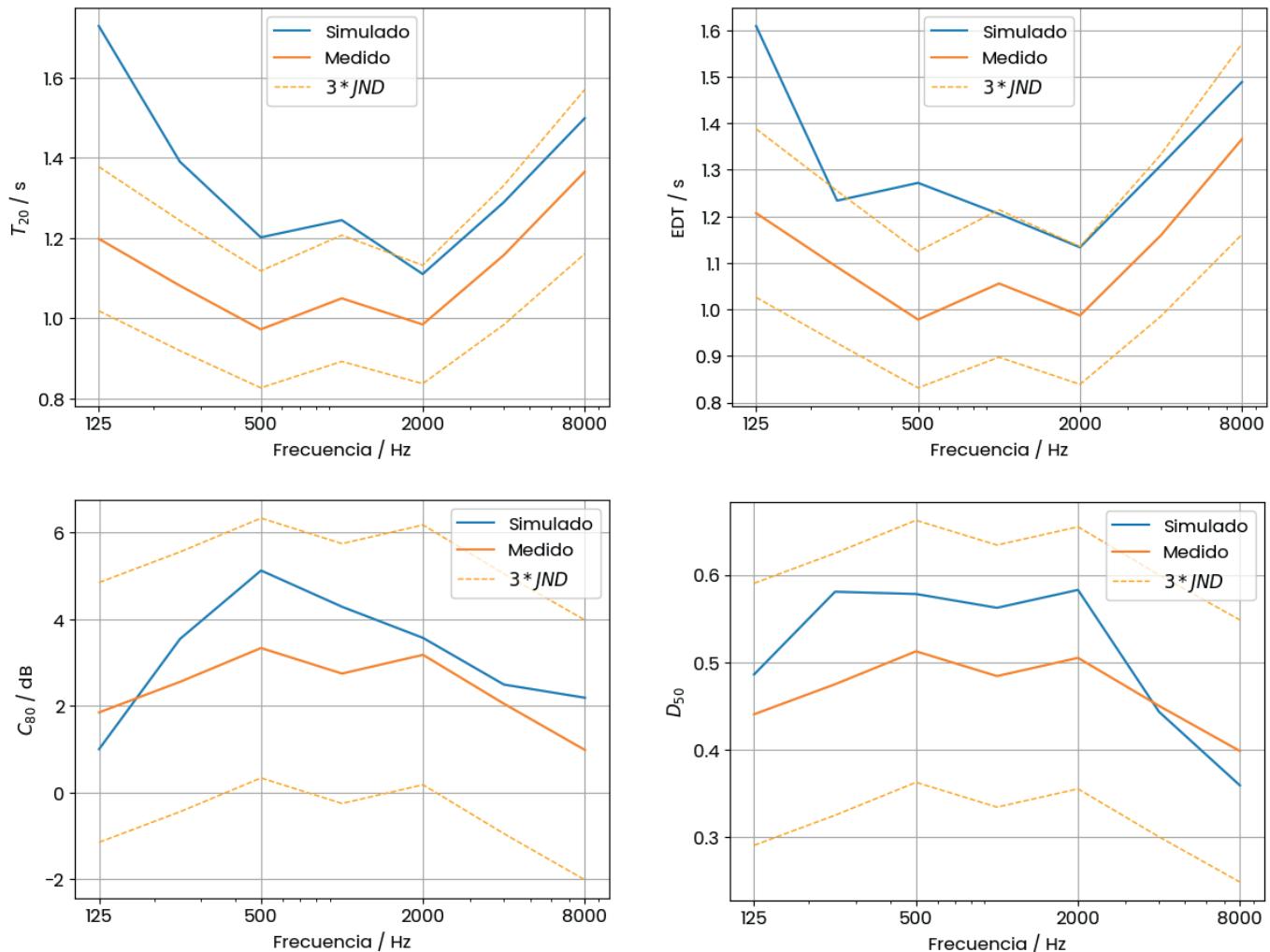


Figura 9. Gráficas resumen de los parámetros acústicos obtenidos de la simulación para el modelo con la concha acústica actual.

Nuevamente, los parámetros T_{20} y EDT son sobreestimados en la simulación, principalmente en las frecuencias más bajas. Los parámetros C_{80} y D_{50} se ajustan mejor a los valores calculados a partir de la medición en sitio. De esta manera, se observa como el software logra acercarse a los parámetros acústicos, considerando se espera que los parámetros T_{20} y EDT se sobreestimen en las frecuencias bajas.

Por último, se obtienen los resultados para el modelo con la concha acústica propuesta. En la Figura 10, se muestra la comparación entre los parámetros acústicos de la concha propuesta con los obtenidos de las simulaciones con los modelos anteriores.

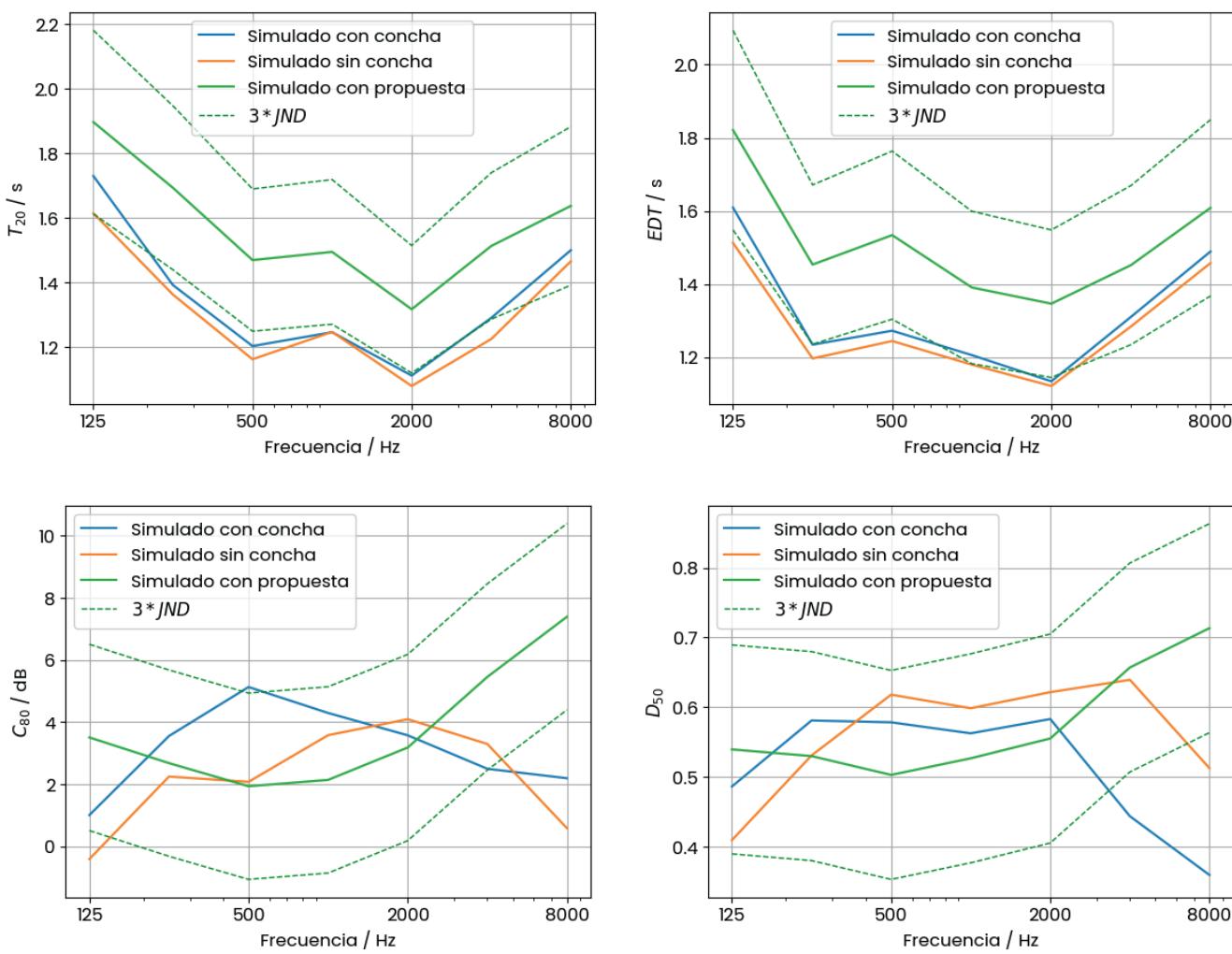


Figura 10. Gráficas resumen de los parámetros acústicos obtenidos de la simulación para el modelo con la concha acústica propuesta en comparación con los obtenidos de los demás modelos.

Lo primero a destacar de estas gráficas es que los gráficos de T20 y EDT parecen tener el mismo comportamiento que los obtenidos de los modelos anteriores, pero ahora con valores más altos en todas las frecuencias. Sin embargo, en ambos casos los valores se ubican alrededor del límite de 3*JND, lo cual da entender que el cambio es apenas perceptible por el oído humano.

Para el caso de los parámetros C80 y D50, no se mantiene el mismo comportamiento que los obtenidos de los modelos anteriores, aunque los cambios parecen ser no perceptibles para la mayoría de las frecuencias estudiadas, ya que tienden a mantenerse en el rango delimitado por 3*JND. Estos comportamientos dan a entender que la concha acústica propuesta logra aumentar los valores de T20 y EDT para todas las frecuencias analizadas, pero que afectan de forma poco predecible y perceptible los parámetros C80 y D50.

Para relacionar los valores de T20 obtenidos en la simulación con los valores esperados en el sitio con concha acústica, sin que la sobreestimación inherente al software tenga un impacto significativo, se propuso calcular el cambio porcentual en T20 al comparar el modelo con la concha acústica propuesta con el modelo de la concha actual. A partir de este análisis, en el Cuadro 3 se presentan los cambios porcentuales entre ambas simulaciones, mostrando los valores T20 que se esperarían si se implementara la concha acústica propuesta.

Cuadro 3. Valores de T20 esperados en el Escenario y Gran Sala del TNCR si se colocara la concha acústica propuesta.

Frecuencia (Hz)	T20
125	1,3137
250	1,3156
500	1,1877
1000	1,2594
2000	1,1666
4000	1,3571
8000	1,4904

Según el resultado del Cuadro 3, se estarían obteniendo valores más altos de T20 en todas las frecuencias, pero solo la frecuencia de 8000 Hz estaría alcanzando el mínimo recomendado de 1,4 s a 1,8 s. Este es el resultado obtenido con el modelo de concha acústica propuesto, sin embargo, el software deja la posibilidad de ejecutar la simulación utilizando geometrías y materiales diferentes para hacer comparaciones entre distintas configuraciones, trabajo que se considera hacer a futuro.

Conclusiones

Este trabajo permitió evaluar y comparar los parámetros acústicos del TNCR a través de simulaciones en COMSOL *Multiphysics* a partir de tres modelos CAD: sin concha acústica, con la concha acústica actual y con una propuesta de diseño. Los resultados mostraron que los parámetros T20 y EDT tendieron a sobreestimarse en las simulaciones, principalmente en frecuencias bajas, lo cual coincide con estudios previos. Los parámetros C80 y D50 se acercaron más a los valores teóricos esperados en todas las frecuencias analizadas. Se confirma que COMSOL *Multiphysics* es una herramienta útil para modelar la acústica de diferentes espacios, aunque presenta ciertas imprecisiones en la estimación de T20 y EDT en bajas frecuencias.

Según la simulación, la concha actual mejora la claridad del sonido, además logra aumentar los valores de T20 y EDT, pero no lo suficiente para alcanzar el rango recomendado de 1,4 s a 1,8 s; es decir, su impacto en la reverberación es limitado, lo que indica que no está optimizada para maximizar la proyección sonora.

La concha acústica propuesta logra un incremento en T20 y EDT, aunque no alcanza los valores recomendados. Se recomienda, al TEC y al TNCR, que mediante futuras investigaciones o trabajos finales de graduación se exploren materiales más reflectantes y geometrías que optimicen la distribución del sonido desde el Escenario hacia la Gran Sala, dirigiendo una mejor calidad de sonido hacia el público.

En este trabajo se muestra el potencial de la simulación acústica para explorar con diferentes configuraciones de geometría y material en el diseño de conchas acústicas. En el caso del TNCR, la metodología propuesta permite identificar mejoras para los parámetros acústicos del lugar, lo cual puede funcionar como una base para futuros análisis.

Agradecimientos

Se agradece a los diferentes departamentos del Teatro Nacional de Costa Rica, especialmente al Departamento de Conservación, los cuales no solo permitieron y facilitaron la ejecución de los análisis en sitio, sino que también facilitaron la información necesaria para realizar el estudio.

Se agradece a la Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental (EISHLA) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por su apoyo con el préstamo del equipo de medición de sonido en reiteradas ocasiones.

Referencias

- [1] ISO 3382-1:2009 *Acoustics -Measurement of room acoustics parameters-*, Estándar, International Organization for Standardization, 2009.
- [2] F. Everest, *Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill, 2001.
- [3] A. Delgado y B. Méndez, "Análisis Acústico del Teatro Nacional de Costa Rica a partir de sus Respuestas Impulsionales", *Tecnología en Marcha*, 2024.
- [4] X. Zhu, G. Xu, J. Kang, X. Xue y Y. Hao, "Influence of Surface Scattering on Auditorium Acoustic Parameters," *Buildings*, vol. 14, n.o 6, 2024. doi: 10.3390/buildings14061882.
- [5] E. García Medina, "Diseño y elaboración de un modelo para la estimación del tiempo de reverberación de un recinto utilizando COMSOL", Madrid, jul. de 2023. dirección: <https://oa.upm.es/80652/>.
- [6] A. Fernández Maldonado, "Diseño de un modelo acústico virtual del Teatro Auditorio Buero Vallejo de Guadalajara", Madrid, jul. de 2021. dirección: <https://oa.upm.es/70348/>.
- [7] F. Brinkmann, L. Aspöck, D. Ackermann, S. Lepa, M. Vorländer y S. Weinzierl, "A round robin on room acoustical simulation and auralization," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 145, n.o 4, págs. 2746-2760, abr. de 2019, issn: 0001-4966. doi: 10.1121/1.5096178.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.