

Análisis Acústico del Teatro Nacional de Costa Rica a partir de sus Respuestas Impulsionales

Acoustical Analysis of the National Theatre of Costa Rica by means of its Room Impulse Responses

Alejandro Delgado-Castro¹, Brayán Mauricio Méndez-Picado²

Fecha de recepción: 14 de abril, 2023
Fecha de aprobación: 7 de setiembre, 2023

Delgado-Castro, A; Méndez-Picado, B.M. Análisis acústico del Teatro Nacional de Costa Rica a partir de sus respuestas impulsionales. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 49-59.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6692>

- 1 Universidad de Costa Rica, Sede Regional de Guanacaste. Costa Rica.
Correo electrónico: alejandro.delgadocastro@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5475-7813>
- 2 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: brayan.mendez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4321-7309>

Palabras clave

Acústica; sonido; respuestas impulsionales; parámetros acústicos; grabaciones sonoras; auralización; Teatro Nacional de Costa Rica.

Resumen

En este artículo se aborda el tema de la caracterización acústica de la sala principal del Teatro Nacional de Costa Rica, realizada a partir de la estimación y el análisis de sus respuestas impulsionales, las cuales se obtienen a su vez a partir del procesamiento de grabaciones sonoras realizadas dentro del espacio, utilizando un parlante de 8 pulgadas como fuente sonora. Se presenta la respuesta impulsional promedio de la sala principal, en formato monoaural y estereofónico, y se obtienen los parámetros acústicos del teatro con el fin de estimar los tiempos de reverberación, los índices de claridad y de definición, tanto de la música como de la voz, así como la calidez y el brillo de la sala, para así brindar una caracterización de la acústica del espacio. Dado que el Teatro Nacional de Costa Rica es una institución dedicada a la promoción de las artes escénicas de alto nivel en el país, así como un monumento histórico y arquitectónico que se conserva para el uso y disfrute del público en general, los resultados aquí presentados constituyen un registro digital de la forma en la que el sonido se propaga dentro de este singular espacio.

Keywords

Room acoustics; sound; room impulse response; acoustical parameters; audio recordings; auralisation; National Theatre of Costa Rica.

Abstract

In this work, the main hall of the National Theatre of Costa Rica is studied in order to obtain an acoustical characterisation of this particular space, based on its estimated room impulse responses, which are measured using an 8-inch loudspeaker as the sound source. These impulse responses are obtained in mono and stereo formats and then used to estimate a set of acoustical parameters, which are then used to estimate the reverberation time, the clarity and definition of the voice and music, as well as other details such as the warmth and brilliance of the room, providing a basis for the acoustical characterisation of the hall. Given the unique features of the National Theatre and its importance as the prime venue for performing arts in Costa Rica, the analysis presented here constitutes a record of its room acoustics and provides a perspective that could help understanding the way in which sound propagates inside this peculiar hall.

Introducción

El Teatro Nacional de Costa Rica es un destacado inmueble de estilo neoclásico alemán, que se encuentra ubicado en la ciudad de San José, en el distrito Catedral, sobre la Avenida 2 y entre las Calles 3 y 5. El edificio es considerado como uno de los más importantes en el país, y es también una joya arquitectónica de la ciudad de San José. Su construcción dio inicio en 1891, a partir de los planos iniciales elaborados por los ingenieros León Tessier, Luis Matamoros, Nicolás Chavarría y Ángel Miguel Velázquez, siendo inaugurado en 1897 con la presentación de la ópera *El Fausto*, de Charles Gounod. En su construcción se utilizaron finos materiales nacionales, como piedra, ladrillos y madera, así como mármol, metales y otros materiales importados de Europa [1, 2].

En este trabajo se realiza una caracterización de la acústica de la sala principal del Teatro Nacional, fundamentada en el análisis de los parámetros acústicos obtenidos a partir de la estimación de su respuesta impulsional. Los resultados generados permiten establecer relaciones entre los elementos presentes en el espacio, y aspectos como el tiempo de reverberación, la claridad de la música y de la voz, así como el brillo y la calidez de la sala.

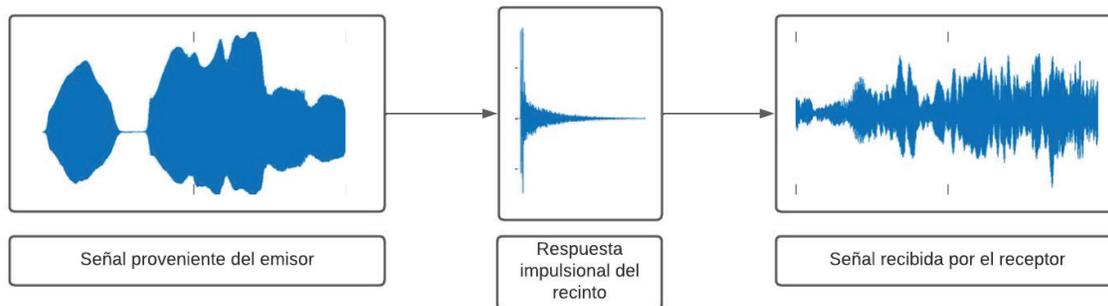


Figura 1. Sistema caracterizado por su respuesta impulsional.

La respuesta impulsional de una sala es la representación temporal de su función de transferencia, la cual relaciona cualquier fuente de sonido ubicada dentro de ella, con el micrófono o receptor que se utilice para registrar el sonido producido. La respuesta impulsional engloba las características acústicas del espacio y permite estimar indicadores que permiten evaluar de forma objetiva la calidad de la experiencia auditiva de quienes se encuentran dentro de la sala [3].

Considerando la sala principal del Teatro Nacional como un sistema, se puede obtener el sonido que escucharía el oyente en una cierta posición dentro de ella al tomar la convolución entre la fuente de sonido original y la respuesta impulsional de la sala. Así, para un sistema como el que se muestra en la Figura 1, la respuesta de la sala está dada por la Ecuación 1, donde $x(t)$ es la señal de excitación del sistema; $y(t)$ es la respuesta del sistema recibida por el oyente o receptor; y $h(t)$ es la respuesta impulsional.

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Ahora bien, la respuesta impulsional de la sala se puede extraer mediante la deconvolución de las señales registradas tanto en el emisor como en el receptor. En este caso, la señal emitida es conocida y las señales recibidas se pueden registrar dentro de la sala utilizando micrófonos. La respuesta impulsional obtenida brinda información sobre el sonido directo y sus reflexiones tempranas y tardías, por lo que suele ser utilizada para estimar una serie de parámetros que permiten a su vez, evaluar las características acústicas del espacio.

Los parámetros acústicos utilizados en esta evaluación se definen en la norma ISO-3382-1 [4], la cual describe el procedimiento necesario para realizar una medición del tiempo de reverberación de un espacio, así como los equipos requeridos. La norma también hace referencia a otros parámetros acústicos y los clasifica en diferentes categorías según su aplicación. A continuación, se definen los parámetros que serán utilizados en este estudio.

Cuadro 1. Tiempos de reverberación recomendados para ciertos espacios.

Espacio	Tiempo de Reverberación Recomendado
Aulas	0,4 s a 0,6 s
Oficinas	0,5 s a 1,1 s
Sala de Conciertos	1,4 s a 2,0 s
Templos o Iglesias	2,0 s a 10,0 s

Tiempo de Reverberación (RT)

Se define como el tiempo transcurrido desde el momento en que la fuente sonora se detiene, hasta el instante en que el nivel de presión sonora en el recinto se reduce 60 dB por debajo de su nivel original; su valor se mide en segundos. En aquellos casos donde el nivel de ruido de fondo no permite observar un decaimiento de 60 dB en el nivel de presión sonora, se suelen utilizar los parámetros T20 o T30, los cuales corresponden al tiempo de reverberación extrapolado a partir de un decaimiento de 20 dB o 30 dB en la presión del sonido dentro de la sala, respectivamente. Los parámetros T20 y T30 también se miden en segundos y se obtienen para diferentes bandas de frecuencia. El Cuadro 1 muestra los tiempos de reverberación recomendados para ciertos espacios.

Tiempo de Reverberación Temprano (EDT)

Es un parámetro acústico que se relaciona más con la reverberación percibida y depende en mayor medida de las reflexiones tempranas. Su valor se obtiene a partir de la regresión lineal de los primeros 10 dB de la curva de decaimiento de Schroeder, la cual se obtiene a partir del cuadrado de la integral de la respuesta impulsional de la sala.

Claridad de la Voz y de la Música (C50 y C80)

La claridad es la relación entre la energía del sonido que recibe la persona oyente durante los primeros instantes a partir de la llegada del sonido directo, y la energía del sonido recibido después de ese lapso. La claridad de la voz (C50) se estima considerando un lapso de 50 ms, mientras que la claridad de la música (C80) toma 80 ms como intervalo de tiempo. Ambos indicadores se obtienen por cada banda de frecuencias, sus valores se expresan en decibeles, y entre más alto sea su valor, mejor será la claridad de la voz o de la música. También es posible realizar una caracterización del espacio por medio del parámetro $C_{50(AV)}$, que se define como la inteligibilidad de la palabra, y se calcula por medio de la Ecuación 2 [5].

$$C_{50(AV)} = 0,15C_{50}(500Hz) + 0,25C_{50}(1kHz) + 0,35C_{50}(2kHz) + 0,25C_{50}(4kHz)$$

(Ecuación 2)

Así mismo, un valor representativo para la inteligibilidad de la música es el parámetro $C_{80(AV)}$, que se calcula por medio de la Ecuación 3 [5].

$$C_{80(AV)} = \frac{C_{80}(500Hz) + C_{80}(1kHz) + C_{80}(2kHz)}{3}$$

(Ecuación 3)

Definición (D50)

La definición es el parámetro que relaciona la energía que llega al escucha durante los primeros instantes de tiempo desde que el sonido directo ha sido emitido, con la energía total emitida por la fuente sonora. Para la definición de la voz se considera un lapso de 50 ms, y su valor se expresa como porcentaje. Cuando la definición es baja, se puede afirmar que la sala es poco íntima, mientras que, por encima de 50% se considera aceptable [6].

Calidez (BR)

Una buena respuesta de la sala ante sonidos con frecuencias bajas denotará una riqueza de graves, una suavidad y melosidad de la música en la sala, y a esto se le denomina calidez acústica. Se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias bajas, y la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias medias, como se muestra en la Ecuación 4 [7].

$$BR = \frac{RT(125 \text{ Hz}) + RT(250 \text{ Hz})}{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1000 \text{ Hz})} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Brillo (Br)

Este parámetro es similar a la calidez, sin embargo, el brillo considera la respuesta de la sala ante las frecuencias altas, lo cual determina qué tan claro es el sonido, así como qué tan brillante es. Se calcula como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias altas y la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias medias, como se muestra en la Ecuación 5 [7].

$$Br = \frac{RT(2000 \text{ Hz}) + RT(4000 \text{ Hz})}{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1000 \text{ Hz})} \quad (\text{Ecuación 5})$$

El análisis de los parámetros anteriores permite evaluar de manera objetiva la calidad de la experiencia auditiva que brinda una sala, así como identificar la influencia que en ella tienen los elementos que la forman. Conocer el desempeño acústico de un espacio permite establecer estrategias de tratamiento acústico que permitan embellecer y mejorar el espectáculo artístico por medio del uso de ciencia e ingeniería [8].

Finalmente, la respuesta impulsional de la sala en formato estereofónico puede ser utilizada para generar efectos sonoros como la auralización, que se define como el proceso mediante el cual el oyente percibe un sonido como si él lo estuviera escuchando dentro de un espacio específico, con la particularidad de que dicho proceso se realiza de manera computacional, sin que el oyente se encuentre físicamente en dicho espacio. La auralización se lleva a cabo mediante la convolución de una señal de audio anecoica con la respuesta al impulso de la sala, ya sea calculada o medida en la ubicación del receptor [9].

Metodología

En este estudio, se obtienen respuestas impulsionales para diferentes puntos dentro de la sala principal del Teatro Nacional de Costa Rica, mediante el análisis de barrido en frecuencia propuesto por Oygo Sound LLC [10] para Matlab³. En este proceso se utiliza una señal de

excitación senoidal cuya frecuencia se incrementa logarítmicamente a través del tiempo, iniciando en 20 Hz y terminando en 20 kHz, lo cual permite cubrir el espectro de frecuencias audibles del ser humano. La señal de excitación mencionada se sintetiza digitalmente considerando una frecuencia de muestreo de 48 kHz, una amplitud de 1, y una duración de 20 s. La señal de excitación es luego utilizada como fuente de sonido cuando es reproducida por un parlante dentro de la sala. De acuerdo con los criterios indicados por Papadakis et al. [11], en este trabajo se emplea un parlante de 8 pulgadas con el fin de obtener resultados útiles, a un costo menor, similares a los presentados en repositorios como OpenAir [12]. El parlante en cuestión es el modelo Kohlt Porta 8⁴, el cual es colocado en el centro del escenario, sobre un pedestal de aproximadamente 1 m de alto.

El sonido emitido por la fuente se propaga por el espacio y es registrado por micrófonos ubicados en puntos particulares de la sala, denominados puntos de medición. Por cada uno de ellos se realiza una grabación sonora en formato monoaural, y otra en formato estereofónico. Aquí se utiliza un micrófono omnidireccional Behringer EMC 8000, y un par estéreo formado por dos micrófonos cardiodes Audio Technica AT2020. La señal de excitación es enviada al parlante a través de una interfase de audio Focusrite Scarlett 4i4, la cual es también utilizada para recibir en la computadora las señales capturadas por los micrófonos, permitiendo así su almacenamiento en forma de archivos de audio sin pérdidas. Como estación de audio digital en la computadora se utiliza el programa Reaper⁵.

Para cada punto de medición se obtiene una respuesta impulsional monoaural y otra estereofónica, por medio de la deconvolución de las señales recibidas por los micrófonos y la señal de excitación. Se define un total de 16 puntos de medición dentro de la sala principal del teatro, en las ubicaciones que se muestran en el diagrama de la Figura 2. La sección de la luneta es cubierta con 9 puntos de medición, más uno adicional ubicado detrás de la cabina de sonido, donde se encuentra la mesa de mezcla. Otros tres puntos de medición se ubican en la sección de butaca, en el primer nivel, y se incluye el pasillo de acceso a la luneta. Finalmente, tres puntos de medición adicionales son colocados en el nivel de palcos, uno a cada lado y otro al centro, en el palco conocido como presidencial.

Las respuestas impulsionales promedio de la sala, tanto en monoaural como en estereofónico, son obtenidas al promediar las respuestas impulsionales estimadas en cada uno de los puntos de medición. Luego, analizando la respuesta promedio monoaural con el software Room EQ Wizard (REW)⁶, se realiza una estimación de la curva de decaimiento de la presión sonora en la sala, de acuerdo con la norma ISO 3382-1, y tomando el cuadrado de su integral se obtiene la curva de decaimiento de Schroeder, la cual se utiliza para estimar el tiempo de reverberación y los parámetros acústicos para un total de siete bandas de octava con frecuencias centrales que van desde los 125 Hz hasta los 8 kHz.

4 <http://www.kohlt-usa.com/esp/porta8.html>

5 <https://www.reaper.fm>

6 <https://www.roomeqwizard.com>

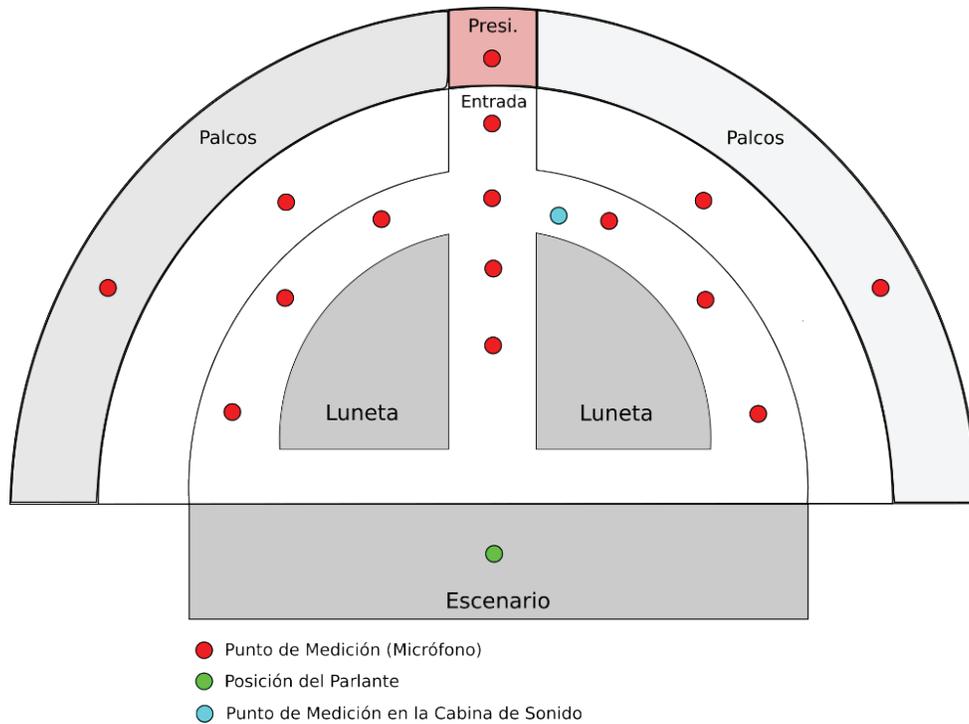


Figura 2. Distribución de puntos de medición.

En la siguiente sección se presentan las respuestas impulsionales obtenidas a partir de las mediciones realizadas, así como los parámetros acústicos estimados. Posteriormente se realiza un análisis de estos resultados y se presenta una caracterización acústica del espacio, donde se relacionan los materiales presentes en el edificio con la forma en la que se propaga el sonido dentro de él y la calidad de la experiencia auditiva que brinda la sala.

Resultados

La respuesta impulsional promedio en formato monoaural se muestra en la Figura 3, mientras que la respuesta impulsional promedio en formato estereofónico se muestra en la Figura 4. La curva de decaimiento de Schroeder se puede observar en la Figura 5.

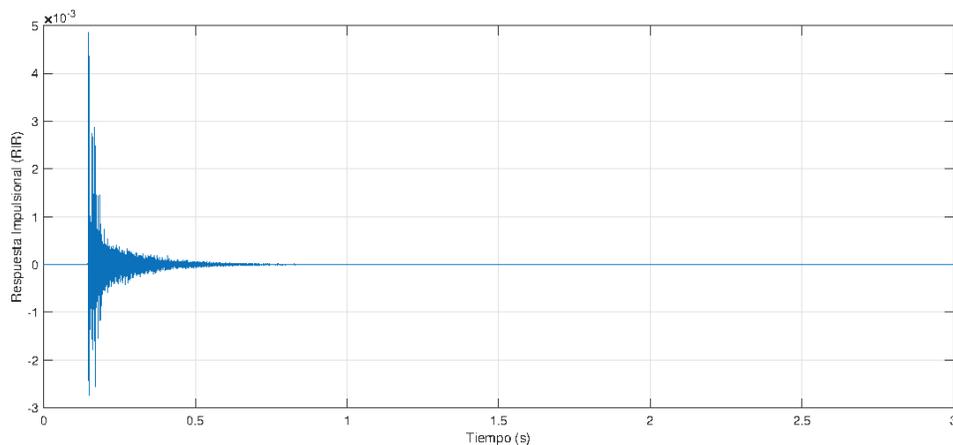


Figura 3. Respuesta impulsional monoaural de la sala principal del Teatro Nacional.

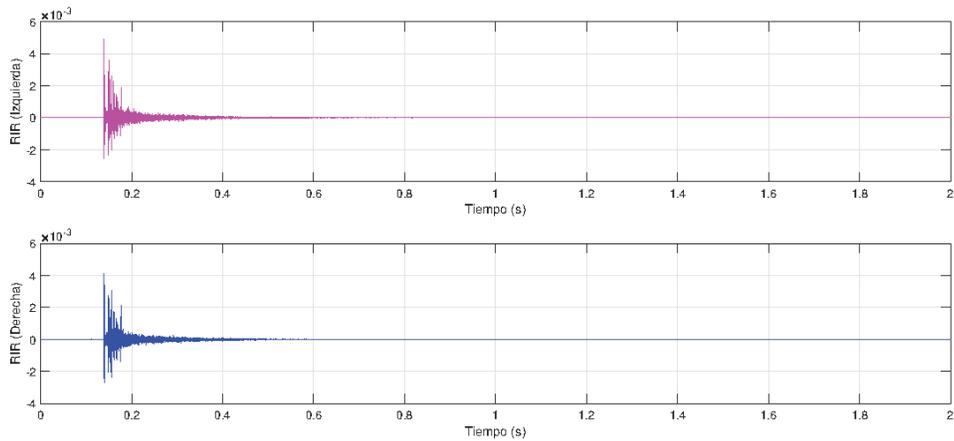


Figura 4. Respuesta impulsional estereofónica de la sala principal del Teatro Nacional.

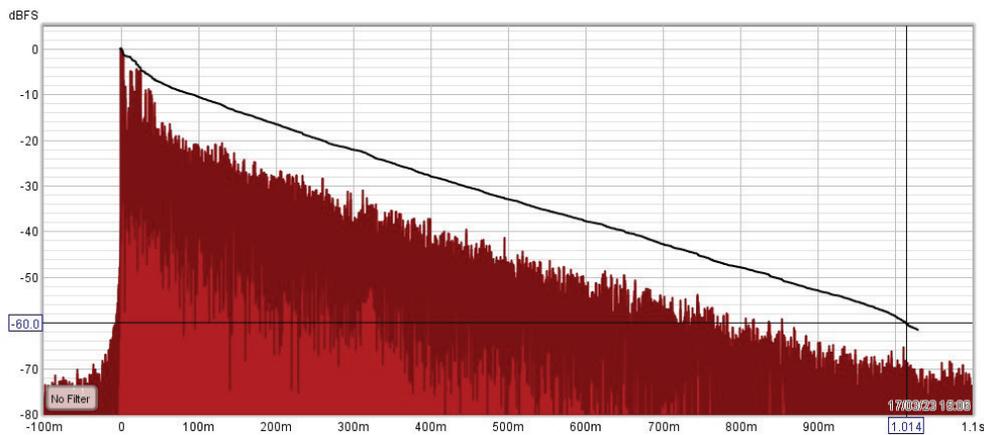


Figura 5. Curva de decaimiento de Schroeder estimada por el software REW.

Por su parte, el Cuadro 2 muestra los parámetros acústicos estimados a partir del análisis de la respuesta impulsional promedio monoaural por medio de la herramienta REW. Las respuestas impulsionales anteriores se encuentran disponibles en el sitio web del proyecto⁷, donde pueden ser descargadas en formato WAV. En el sitio también se presenta la auralización de una grabación anecoica utilizando la respuesta impulsional de la Figura 4.

Cuadro 2. Parámetros acústicos de la sala principal del Teatro Nacional.

Parámetro	Banda de Frecuencias						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
EDT	0,724	0,778	1,048	0,988	1,051	0,536	0,303
T20	1,072	1,106	1,118	1,101	1,152	0,986	0,797
T30	1,406	1,222	1,131	1,163	1,168	1,015	0,833
C50	1,35	2,46	-0,04	1,69	2,31	6,47	9,26
C80	4,21	4,86	3,09	4,22	5,00	9,03	12,27
D50	57,7	63,8	49,8	59,6	63,0	81,6	89,4

7 <https://electricasg.ucr.ac.cr/acustica.html>

La gráfica de la Figura 5 muestra un tiempo de reverberación total de aproximadamente 1,014 s para la sala principal del Teatro Nacional, el cual es bastante similar al promedio de los valores reportados en el Cuadro 2 para los parámetros T20 y T30.

Considerando que el volumen de la sala principal es de aproximadamente 7200 m³, con un área de planta aproximada de 600 m², el tiempo de reverberación obtenido puede que sea un valor bajo, en especial para una sala de conciertos de este tipo, donde se recomienda un tiempo de reverberación de entre 1,4 s y 2,0 s (ver Cuadro 1). Este comportamiento también se evidencia en los valores obtenidos para el parámetro EDT en cada banda de frecuencias, pues lo recomendable para una sala donde se realizan interpretaciones musicales es que los valores de EDT para frecuencias medias (entre 500 Hz y 1 kHz) se encuentren por encima de 1,5 s. No obstante, los valores presentados en el Cuadro 2 se encuentran por debajo de ese límite recomendado.

El bajo tiempo de reverberación observado podría responder a un exceso de absorción acústica dentro de la sala, la cual reduce significativamente la energía del sonido. La presencia de múltiples butacas y sillas tapizadas podría ser un factor importante a considerar en ese sentido, dado que su coeficiente de absorción es bastante alto para todas las bandas de frecuencia. A esto se le suma el alfombrado y las molduras de madera presentes en las barandas de los palcos y de la galería, así como el cielo raso de madera que se encuentra cubierto con pinturas al fresco.

En relación con la claridad, para caracterizar el espacio por medio de este parámetro es necesario evaluar las Ecuaciones 2 y 3 que definen la inteligibilidad de la voz y de la música. En este caso, se utilizan los valores de claridad reportados en el Cuadro 2. Así entonces, en el caso de la inteligibilidad de la voz, se obtiene el siguiente resultado:

$$C_{50(AV)} = 0,15(-0,04) + 0,25(1,69) + 0,35(2,31) + 0,25(6,47)$$

$$C_{50(AV)} = 2,84 \text{ dB}$$

El parámetro $C_{50(AV)}$ se obtiene para medir la inteligibilidad de la palabra en el espacio y se recomienda que su valor sea mayor a 2 dB. En este caso, el resultado es de 2,84 dB, con lo cual se puede concluir que la inteligibilidad de la palabra en el Teatro Nacional es buena. Luego, para el caso de la inteligibilidad de la música, el parámetro $C_{80(AV)}$ sería:

$$C_{80(AV)} = \frac{3,09 + 4,22 + 5,00}{3}$$

$$C_{80(AV)} = 4,10 \text{ dB}$$

Según los valores recomendados para este parámetro, se debería tener un valor de entre 4 dB y 12 dB para salas vacías, por lo que el espacio cumple con los requerimientos para ofrecer una buena inteligibilidad musical. Así mismo, tomando el valor encontrado para el parámetro $C_{80(AV)}$, se observa también que el tipo de música que se verá más beneficiado en este tipo de espacio será la ópera [5].

Con respecto a la definición, y con el fin de determinar qué tan íntima es la sala desde el punto de vista acústico, se busca que los valores obtenidos para el parámetro D50 se encuentren por encima de 70%, para tener una muy buena definición, o bien, por encima de 50% para casos aceptables. Como se observa en el Cuadro 2, los valores de D50 son aceptables, excepto para la banda de 500 Hz donde D50 se encuentra levemente por debajo del valor recomendado.

Para las bandas de altas frecuencias se sobrepasa dicho valor. Dado que la definición evalúa los patrones de las reflexiones dentro de la sala, la escasez de reflexiones tempranas podría estar contribuyendo a la disminución en la calidad de la definición del sonido, en particular, la definición de la voz.

Ahora, para evaluar la respuesta del espacio ante las bajas frecuencias se calcula la calidez acústica por medio de la Ecuación 4, donde el tiempo de reverberación para cada banda de frecuencia se estima por medio del parámetro T30.

$$BR = \frac{1,406 + 1,222}{1,131 + 1,163}$$

$$BR = 1,14$$

El rango óptimo para la calidez son los valores entre 1,10 y 1,45. Para este caso, un valor de 1,14 para el parámetro BR indica que el espacio brindará una adecuada calidez acústica, puesto que se encuentra dentro del rango recomendado. Ahora, considerando el brillo acústico, se evalúa la Ecuación 5, donde se toma también el parámetro T30 como tiempo de reverberación en cada banda de frecuencia, por lo que se obtiene lo siguiente:

$$Br = \frac{1,168 + 1,015}{1,131 + 1,163}$$

$$Br = 0,95$$

En este caso, el valor del brillo acústico obtenido es de 0.95, lo cual muestra un comportamiento adecuado ya que lo recomendado es cualquier valor mayor a 0.87. Por lo tanto, el comportamiento de la sala es el deseado en cuanto a brillo acústico.

Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo resume los resultados obtenidos a partir del análisis de las mediciones acústicas realizadas en la sala principal del Teatro Nacional de Costa Rica. Dichas mediciones permitieron obtener la respuesta impulsional promedio de la sala principal del Teatro Nacional, en formato monoaural y estereofónico, utilizando un parlante de 8 pulgadas como fuente de sonido, así como un micrófono de análisis omnidireccional y un par estéreo formado por dos micrófonos cardiodes.

Posteriormente se obtuvo una serie de parámetros, con los cuales se logró caracterizar la acústica de este espacio, el cual posee una gran importancia para la vida cultural costarricense. Lo anterior permitió analizar aspectos como el tiempo de reverberación, la claridad de la voz y de la música, así como su definición. También se realizó un análisis de la calidez y del brillo acústicos obteniéndose resultados importantes para comprender la forma en la que se propaga el sonido dentro de la sala y la calidad de la experiencia auditiva que el inmueble puede ofrecer a su audiencia.

En general, la sala principal del Teatro Nacional de Costa Rica exhibe indicadores positivos en cuanto a claridad, inteligibilidad de la voz y de la música, calidez y brillo acústicos. En cuanto a su definición, los resultados muestran que el desempeño de la sala es aceptable para las bandas de frecuencia bajas y medias, así como adecuado a altas frecuencias. No obstante, se identificó un desempeño bajo en cuanto al tiempo de reverberación de la sala, que podría disminuir la calidad de la experiencia acústica que ella brinda, sobre todo en espectáculos que involucran interpretaciones musicales. Un exceso de absorción dentro de la sala podría

ser la causa más probable del bajo tiempo de reverberación registrado, por lo que se podría explorar la posibilidad de reducir el tapizado de las barandas o de las sillas, o bien, reducir el uso de alfombrado en la luneta. No obstante, antes de realizar modificaciones mayores en la infraestructura de la sala, se recomienda comparar estos resultados con mediciones realizadas con un parlante dodecaedro como fuente sonora.

Se espera que los resultados obtenidos sean de utilidad para el Teatro Nacional de Costa Rica, sobre todo en lo que respecta a tener una mejor comprensión de la forma en la que se propaga el sonido dentro de él. Así mismo, la investigación realizada constituye un registro digital de las características sonoras del inmueble, con el cual también se pueden realizar auralizaciones y otros efectos de sonido.

En futuras investigaciones se plantea realizar este análisis con una fuente omnidireccional, o bien, con el sistema de sonido propio del Teatro Nacional, para conocer su influencia en la acústica de la sala. Así mismo, se pretende extender el análisis realizado a otros espacios del inmueble, como por ejemplo el foyer, donde también se interpreta música y se realizan representaciones artísticas de gran importancia.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo recibido por parte del personal técnico y administrativo del Teatro Nacional de Costa Rica, así como la apertura y la colaboración brindadas durante la realización de las mediciones en la sala principal.

Referencias

- [1] A. Fischel Volio, "Historia del Teatro Nacional", *Sin Publicar*, 1997.
- [2] A. Ulloa Zamora, "El Teatro Nacional: Apuntes para la Biografía de un Coliseo", *Editorial Costa Rica*, 1972.
- [3] M. Stumpf González, J. Colnaghi y M. Oliveira Nunes, "Análisis acústico del auditorio Padre Werner en Unisinos", *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 33, no. 3, págs. 291-300, 2018.
- [4] International Organization for Standardization, "Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters", ISO 3382:1997, 1997, <https://www.iso.org/standard/2354.html>.
- [5] W. M. Leach, "Introduction to electroacoustics and audio amplifier design", 3. Ed, *Van Haren Publishing*, 2003.
- [6] H. Arau, "ABC de la acústica arquitectónica", 1. Ed. *Grupo Editorial CEAC*, 1999.
- [7] A. Carrion Isbert, "Diseño acústico de espacios arquitectónicos", 1. Ed. Ediciones *Universidad Politécnica de Catalunya*, 1998.
- [8] T. J. Cox y P. D'Antonio, "Engineering art: the science of concert hall acoustics," *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 28, no. 2, págs. 119-129, 2003.
- [9] Hará, R, Iwami, T, y Omoto, A, "Subjective evaluation of auralization using a directional sound source that simulates a trumpet", *Acoustical Science and Technology*, vol. 43, no. 2, 2022.
- [10] Oygo Sound LLC. "Swept-sine analysis". *MATLAB Central File Exchange*, 2023. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29187-swept-sine-analysis>
- [11] Papadakis, N, Serras, A, Stavroulakis, G, "Mimicking the sound field of a dodecahedral loudspeaker by a common directional loudspeaker for reverberation time measurements", *Actas de la conferencia EURONOISE*, Grecia, 2018.
- [12] OpenAir, "IR Data and Anechoic Data", *University of York*, United Kingdom, 2023. https://www.openair.hosted.york.ac.uk/?page_id=310