

Análisis acústico del auditorio Padre Werner en Unisinos

Acoustic analysis of the Padre Werner Unisinos auditorium

M. Stumpf González ¹*, J. Colnaghi *, M. Oliveira Nunes *

* Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo. BRAZIL

Fecha de Recepción: 10/04/2018

Fecha de Aceptación: 02/07/2018

PAG 291-300

Abstract

The acoustic quality in enclosed spaces is defined by the constructive characteristics of the environment, which must be designed to increase the propagation of the sound. Therefore, the sound message to be transmitted, whether spoken, song or by music instruments, can be intelligibly captured by the listeners. Among the main characteristics that influence the sound behavior in rooms are its dimensions, its geometric shape and the finishing materials applied on their internal surfaces. Each room has different acoustic requirements, directly related to the purpose for which it is intended. Therefore, the professional responsible for the design and construction of these environments should analyze and recognize the needs of each case. In this way, the present case study presents the evaluation of the acoustic quality of a multiple use auditorium, at Unisinos Campus, in São Leopoldo, southern Brazil. Acoustic measurements were performed to calculate the Reverberation Time (T30) and the Early Decay Time (EDT) of the room. Afterwards, the modelling of the auditorium in the acoustic simulation software CATT-Acoustics was carried out, allowing the estimation of other objective acoustic parameters such as the Speech Transmission Index (STI), Definition (D50) and Clarity (C80). The results obtained through measurements and acoustic simulations show that the auditorium has satisfactory acoustic quality for speech, but it is not so suitable for receiving musical presentations. The model generated in the software also made it possible to simulate constructive solutions aiming to improve the acoustic quality of the room.

Keywords: Room Acoustics, auditorium, computational acoustic simulation, constructive solutions

Resumen

La calidad acústica en espacios cerrados se define por las características constructivas del entorno, que deben diseñarse para aumentar la propagación del sonido. Por lo tanto, los oyentes pueden captar de forma inteligible el mensaje de sonido que se transmitirá, ya sea hablado, una canción o por instrumentos de música. Entre las principales características que influyen en el comportamiento del sonido en las habitaciones se encuentran sus dimensiones, su forma geométrica y los materiales de acabado aplicados en sus superficies internas. Cada habitación tiene diferentes requisitos acústicos, directamente relacionados con el propósito para el que está destinado. Por lo tanto, el profesional responsable del diseño y la construcción de estos entornos debe analizar y reconocer las necesidades de cada caso. De esta forma, el presente estudio de caso presenta la evaluación de la calidad acústica de un auditorio de uso múltiple, en el Campus de Unisinos, en São Leopoldo, sur de Brasil. Se realizaron mediciones acústicas para calcular el Tiempo de Reverberación (T30) y el Tiempo de Decaimiento Temprano (EDT) de la habitación. Posteriormente, se realizó el modelado del auditorio en el software de simulación acústica CATT-Acoustics, permitiendo la estimación de otros parámetros acústicos objetivos como el Índice de Transmisión del Habla (ITS), la Definición (D50) y la Claridad (C80). Los resultados obtenidos a través de mediciones y simulaciones acústicas muestran que el auditorio tiene una calidad acústica satisfactoria para el habla, pero no es tan adecuado para recibir presentaciones musicales. El modelo generado en el software también hizo posible simular soluciones constructivas con el objetivo de mejorar la calidad acústica de la sala.

Palabras clave: Acústica de habitaciones, auditorio, simulación acústica computacional, soluciones constructivas

1. Introducción

El objetivo del análisis de la acústica de habitaciones es inspeccionar el comportamiento del campo acústico en habitaciones cerradas, con el propósito de mostrar pautas que ayuden en el diseño de ambientes que cumplan con los distintos requerimientos acústicos relacionados con el propósito para los cuales están destinados, que son muy variables y difíciles de generalizar (Rossing, 2007; Henrique, 2009).

Para que una sala tenga una calidad acústica satisfactoria, es esencial que cumpla con ciertos requerimientos de desempeño con respecto al aislamiento acústico, evitando la transmisión del ruido tanto del exterior como del interior del propio edificio y del tratamiento del sonido en el interior de la habitación con el propósito de ajustar las características constructivas de los espacios

cerrados que demandan condiciones de comunicación satisfactorias, tales como aulas, teatros, salas de conciertos, espacios y auditorios multipropósito, salas de conferencia y auditorios multipropósito de modo tal que la distribución del sonido dentro de la habitación alcance una calidad satisfactoria para su uso (Long, 2006; Brandão, 2016; Ricciardi y Buratti, 2018).

En cuanto al tratamiento del sonido dentro de la habitación, es importante recalcar que las habitaciones diseñadas para el habla necesitan un nivel más alto de inteligibilidad y un corto tiempo de reverberación. Por lo tanto, su forma debe estar diseñada para minimizar la distancia fuente-receptor, su volumen debe ser reducido y los materiales de absorción deben aplicarse en toda la habitación, así como también los elementos geométricos que dirigen las primeras reflexiones a la audiencia para favorecer el sonido directo. Las salas de conciertos deben tener un volumen más alto y una forma que proporcione reflexiones laterales potentes, con superficies rugosas y corrugadas que entreguen difusión del sonido, distribuyendo el sonido de manera uniforme por toda la habitación y asegurando un

¹ Autor de correspondencia:

*Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo. BRAZIL

E-mail: mgonzalez@unisinos.br



campo reverberante más denso, logrando que la audiencia se sienta rodeada por el sonido y valorando aspectos subjetivos de los sonidos musicales, tales como textura y calidad tonal (Long, 2006; Rossing, 2007; Barron, 2010).

Ya que la experiencia auditiva de los individuos en una habitación es subjetiva y está relacionada con el gusto y el entrenamiento auditivo de cada oyente, se vuelve necesario utilizar mediciones que apunten a calcular los efectos subjetivos que el campo acústico entrega y estos están expresados por medio de parámetros acústicos objetivos (Beranek, 2004; Brandão, 2016; Ricciardi y Buratti, 2018).

El tiempo de reverberación es el parámetro principal debido a su relación general con los otros parámetros acústicos de la habitación y las experiencias subjetivas, además de la importante influencia del concepto de reverberación en la teoría de la acústica de habitaciones. Fue desarrollado hace mucho tiempo y por ende es el parámetro más conocido que cuenta con la mayor cantidad de información acerca de los mejores valores, tanto en las referencias bibliográficas como en la legislación (Beranek, 2004; Rossing, 2007; Vorländer, 2007).

No obstante, es importante analizar un grupo de parámetros ya que cada uno apunta a evaluar una o más experiencias subjetivas o dimensiones. Además, vale la pena destacar que los valores recomendados para cada parámetro varían según el uso que se le dé a la habitación, si está dedicada al habla, la música o usos múltiples, y que debería considerarse en el diseño del proyecto (Barron, 2010; Brandão, 2016).

Existen varios estudios acerca de los aspectos acústicos en espacios de auditorios, que incluyen medidas de campo (Rudno-Rudziński y Dziechciński, 2006; Kahle, 2013; Groendyke y Gipson, 2015; Jeon et al., 2015; Witew y Vorländer, 2016; Navvab y Heilmann, 2017; Ricciardi y Buratti, 2018), modelado o cálculo (Garrido et al., 2012; Mak y Wang, 2015; Wenmaekers et al., 2017), diseño o rediseño (Ortega y Rivera, 2013; Brill et al., 2014; Coffeen, 2014; Szeląg y Flaga, 2015; Alam et al., 2016; Ortiz, 2016; Jambrošić et al., 2016; Jeon, Jang y Lim, 2016; Lu et al., 2016; Barron y Kissner, 2017; Guthrie et al., 2017; Mahalingam, 2017) historia y conceptos (Adelman-Larsen, 2014; Mourjopoulos, 2016).

Aunque existen diferentes propósitos en estos estudios, hay algunos elementos comunes, tales como el uso de medidas y simulación por computadora del tiempo de reverberación como uno de los parámetros principales en el análisis de rendimiento acústico. Otro resultado común es la diferencia en los requerimientos de la audiencia para propósitos de habla o de música, sugiriendo la necesidad de adaptaciones para optimizar según un uso u otro.

El objetivo de este estudio es presentar la evaluación de la calidad acústica de un auditorio de uso múltiple ubicado en un Campus Universitario en São Leopoldo, al sur del Brasil.

2. Método

El método para evaluar la calidad acústica del auditorio Padre Werner adoptado en el presente estudio de caso consistió inicialmente en la medición del tiempo de reverberación de la habitación desocupada mediante el método del ruido interrumpido, siguiendo las pautas de ISO 3382-1:2009. El segundo paso fue crear un modelo de la habitación en el software de simulación acústica CATT-Acoustics para simular la influencia de la audiencia en el tiempo de reverberación de la habitación y para estimar otros parámetros objetivos, además de hacer posible proponer soluciones constructivas para aumentar la calidad acústica de la habitación.

2.1 Características del objeto de estudio

El auditorio Padre Werner está ubicado en el Campus de la Universidad de Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), de São Leopoldo, al sur del Brasil. Tiene una capacidad de 703 personas. La habitación está diseñada para recibir espectáculos culturales (música orquestal y teatro) y actividades de habla tales como ponencias, conferencias y otros eventos. El auditorio se caracteriza como una sala de uso múltiple. La distribución del edificio consiste de un escenario y dos niveles con asientos para la audiencia (Figura 1).

Las paredes laterales están acabadas con cemento, pintadas en el centro y tiene un acabado de hormigón liso sin pintar en la parte posterior y frontal del auditorio. La pared trasera está cubierta con una alfombra delgada sobre una superficie sólida. Los asientos están medianamente tapizados con un revestimiento de tela. Los espacios entre los grupos de asientos son de 1,00 m en el nivel inferior y de 1,50 m en el nivel superior de la habitación. La altura de las filas de asientos es de 10 cm en el nivel inferior y de 20 cm en el nivel superior. El área de cada asiento es de 0,495 m² (0,90 x 0,55m). El suelo está cubierto con alfombra a excepción del escenario que tiene piso de madera sobre un suelo duro. La parte trasera del escenario está cerrada con cortinas de tela colgadas a 1,00 m de la pared. Las puertas de acceso al auditorio están hechas de madera. El cieloraso tiene un revestimiento metálico con una inclinación del 12,5 % desde el inicio del escenario hasta la pared trasera de la habitación (Figura 1).

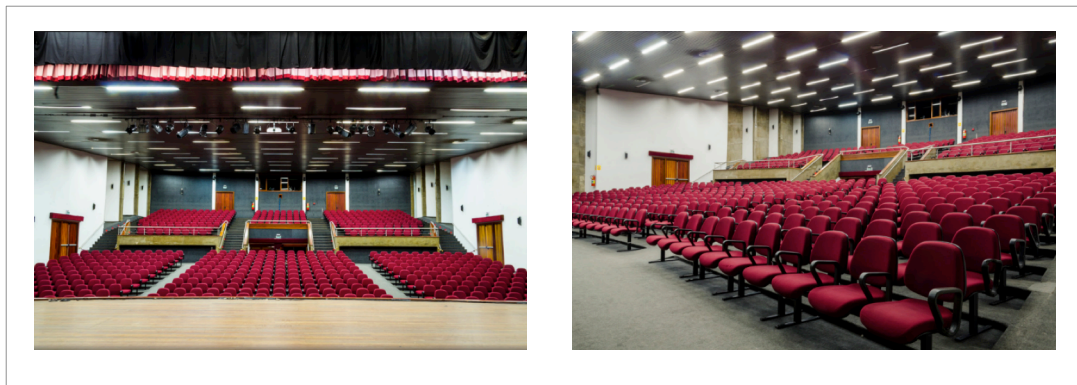


Figura 1. Vistas interiores del auditorio Padre Werner

2.2 Procedimiento de medición

Ya que el auditorio Padre Werner se utiliza como un auditorio multiusos, se decidió analizar su calidad acústica tanto para actividades de habla como para presentaciones musicales. Para ello, los datos recabados con la fuente de sonido en la posición 1 estaban destinados a analizar la habitación para las actividades de habla, ya que el hablante tiende a ubicarse más cerca de la audiencia y los datos de la fuente de sonido en la posición 2 fueron utilizados para evaluar el comportamiento del sonido para presentaciones

musicales, considerando que los músicos de una orquesta, por ejemplo, tienden a ubicarse más al centro del escenario. El plano del suelo (Figura 2) enfatiza el esquema de medición. La posición 1 de la fuente de sonido está ubicada a 1,70 m del frente del escenario, mientras que la posición 2 está a 5,10 m del frente del escenario. Los puntos numerados del 1 al 30 están relacionados con la posición 1 de la fuente de sonido, mientras que los puntos numerados del 31 al 60 se refieren a mediciones con la segunda posición de la fuente.

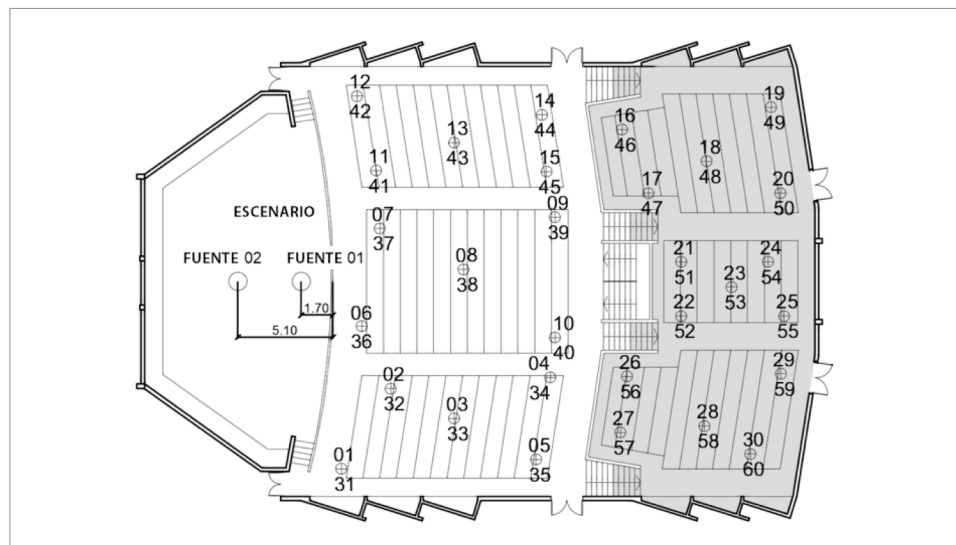


Figura 2. Plano del suelo del auditorio Padre Werner con las posiciones de la fuente de sonido y los puntos de medición



Las medidas del tiempo de reverberación y los equipos utilizados para seguir las pautas instituidas en la ISO 338s-1:2009 – Medición de los parámetros acústicos de la sala – Parte 1: Rendimiento de las habitaciones. Los equipos utilizados en las mediciones fueron:

- Analizador de sonidos Bruel&Kjaer tipo 2270
- Fuente de sonido omnidireccional Bruel&Kjaer Omnipower 4292-L
- Preamplificador de micrófono Bruel&Kjaer modelo ZC-0032
- Micrófono tipo 4189 Bruel&Kjaer
- Calibrador de sonido tipo 4231 Bruel&Kjaer
- Amplificador de potencia tipo 2734 Bruel&Kjaer
- Cable AQ-0673
- Línea métrica calibrada
- Medidor multifuncional Instrutemp modelo ITMP600 para verificación de la temperatura y la humedad

Considerando la naturaleza aleatoria de la señal utilizada en el método de medición, pueden aparecer algunas variaciones en los resultados. Por esta razón, el procedimiento se repitió tres veces para cada punto medido y así aumentar la calidad de los datos para la curva de actividad.

2.3 Simulación Acústica

Las simulaciones computacionales del rendimiento acústico del auditorio fueron desarrolladas con el *software* de simulación acústica CATT-Acoustics. El proceso de simulación consiste en la implantación de un modelo virtual tridimensional de la habitación en el programa (Figura 3), asignando las superficies (incluyendo las paredes, los cielorrasos, pisos, escenario, puertas, ventanas, audiencia, muebles y otros) y sus formas. En secuencia, se incluyen las propiedades de los materiales de terminación aplicados en ellas como la absorción y difusión acústica (a través de la absorción (α), y los coeficientes de dispersión acústica (s) definidos por frecuencia y en bandas de octava, respectivamente). Estos coeficientes deben ajustarse para obtener los resultados que sean más cercanos a la realidad, comparándolos con los valores obtenidos por medio de las mediciones. También se definen las posiciones de los receptores y la fuente de sonido en la habitación, atribuyéndole a ello las características de direccionalidad, potencia y el rango de frecuencias de la fuente de sonido.

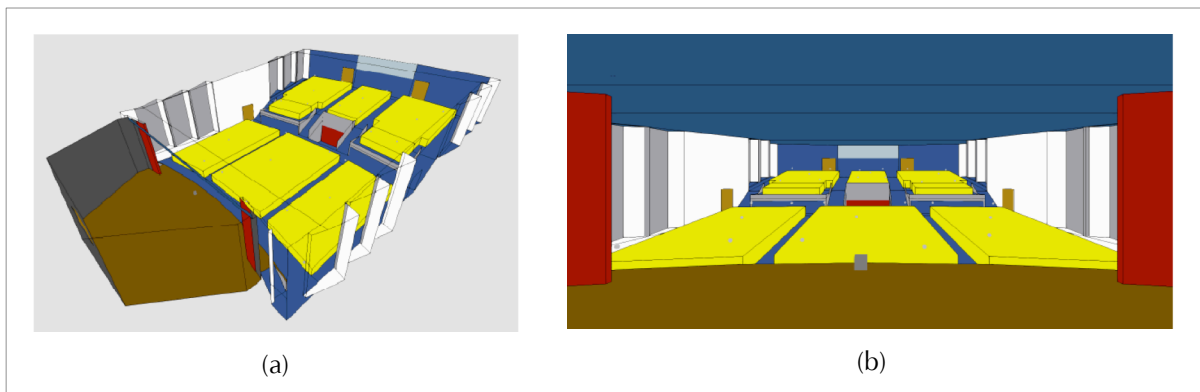


Figura 3. Modelos del auditorio: (a) vista aérea y (b) vista de escenario

2.4 Elección de los parámetros

2.4.1 Tiempo de reverberación (T60, T20, T30)

la reverberación se define como la persistencia de la energía del sonido en un espacio cerrado después de que la fuente de sonido ha sido desconectada. Por lo tanto, el parámetro de tiempo de reverberación muestra cuánto tiempo transcurre antes que el nivel de presión de sonido emitido desde la fuente se reduce a 60 dB después de su interrupción y también puede medirse con un decaimiento de 20 dB y/o 30 dB, extrapolando los resultados obtenidos matemáticamente si el ruido de fondo en la habitación no permite una medición adecuada de decaimiento de 60 dB (Henrique, 2009; Barron, 2010). Según las normas y las referencias bibliográficas consultadas, el mejor valor de tiempo de reverberación para actividades de habla en una

habitación con el volumen de objeto de estudio es alrededor de 0,8 s y 1,2 s en la banda de 500 Hz y aún debería ser plano en otras frecuencias. Ya para las presentaciones de música, especialmente aquellas que no cuentan con refuerzos de sistemas de sonido, el mejor valor puede variar mucho, debido a los diversos tipos de música, ya que cada una tiene una demanda específica y diferenciada. Sin embargo, las habitaciones mejor evaluadas para este propósito poseen tiempos de reverberación de alrededor de 1,8 s y 2,0 s en la banda de 500 Hz, y aún debe estar plano en las frecuencias medias y altas sobre esta y tienen un incremento gradual en las frecuencias bajas, valorando algunos aspectos subjetivos de la música tales como el timbre de los instrumentos, la textura y la riqueza de tono de los sonidos musicales.

2.4.2 Tiempo de Decaimiento Temprano (EDT)

el EDT se define como el tiempo, en segundos, necesario para que ocurra una disminución de 10 dB en el nivel de sonido después de que cesa la emisión de la fuente de sonido, multiplicado por un factor de 6, de modo que sea posible hacer comparaciones directas con los valores del tiempo de reverberación (Beranek, 2004). El EDT está relacionado con la impresión subjetiva de cómo la señal de la fuente está influenciada por la reverberación y sus mejores valores para seguir los mismos criterios que los del tiempo de reverberación (Barron, 2010).

2.4.3 Definición (D50)

La D50 es el parámetro que muestra la proporción de energía sonora que llega al receptor a 5 ms después de que se emitió el sonido directo y la energía total. Las reflexiones de sonido que llegan al receptor dentro de este periodo se consideran beneficiosas porque mejoran el sonido directo. La D50 se usa para evaluar la inteligibilidad del habla. Los valores mayores a 0,5 (50 %) se consideran aceptables y muestran que las primeras reflexiones llevan la mayor parte de la energía contenida en la respuesta del impulso (Brandão, 2016).

2.4.4 Claridad (C80)

Es un parámetro como la D50, pero considera la proporción entre la energía acústica antes y después de los 80 ms. La C80 es muy influyente en salas destinadas a la reproducción de música, ya que muestra el balance entre la claridad con que se recibe el sonido y la reverberación del ambiente. Los valores recomendados para este parámetro dependen especialmente del tipo de música para el que la habitación está diseñada y mientras mayor sea este valor (en dB), menos reverberante será la habitación (Brandão, 2016). Los valores óptimos para la música de orquesta deberían oscilar entre los -2 dB y +2 dB (Barron, 2010).

2.4.5 Índice de Transmisión del Habla (ITS)

El ITS es un índice que está directamente vinculado con la inteligibilidad del habla. Este parámetro considera la influencia del ruido de fondo y la reverberación del ambiente para evaluar qué tan distorsionada llega la señal de sonido al receptor en relación con la señal original, causando

interferencia en la comprensión del habla, donde 1 es el mayor valor ideal y los valores más bajos muestran una reducción de la inteligibilidad (Vorländer, 2007).

3. Resultados y análisis

Se realizó un total de 30 mediciones (5 por cada grupo de asientos) para cada posición de la fuente de sonido (1 y 2), con un total de 60 mediciones (Figura 2). Las mediciones se realizaron por medio del método del ruido interrumpido con la habitación desocupada. La temperatura dentro del auditorio al momento en que se tomaron las mediciones era de 27,6°C y la humedad relativa del aire era de un 61 %. La señal de espectro plano (ruido blanco) se emitió por la fuente de sonido hasta que la habitación alcanzó un estado estable de funcionamiento y luego la fuente fue apagada y el micrófono acoplado al analizador midió el decaimiento de la energía del sonido (Figura 4).

Los datos recopilados fueron transferidos desde el analizador al computador a través del software Bruel & Kjaer BZ-5503 y luego fueron transferidos al software de tiempo de reverberación. Posteriormente, se calcularon los parámetros relacionados con el tiempo de reverberación (T20, T30 y EDT).

El primer parámetro que fue analizado fue el tiempo de reverberación (Figura 5). Los resultados obtenidos a través de las mediciones presentaron valores de T30 ligeramente por encima de lo recomendado para las actividades de habla, pero inferior a los necesarios para la música en ambas posiciones de la fuente de sonido, con un valor promedio de 1,22 s en la banda de frecuencia de 500 Hz. Sin embargo, luego de ajustar los coeficientes de absorción y dispersión en el software de simulación acústica CATT-Acoustics para la simulación de resultados para aproximar los valores medidos, se estimó el tiempo de reverberación de la habitación considerándola ocupada y se obtuvo valores de 1 s en la banda de 500 Hz, que está dentro del rango recomendado para el habla. No obstante, es peor para las presentaciones musicales. Los valores de EDT fueron más altos que los valores de T30 en todo el rango de frecuencia medido, especialmente a frecuencias más bajas, mostrando una impresión subjetiva más intensa de la reverberación, lo que es perjudicial para la inteligibilidad del discurso.

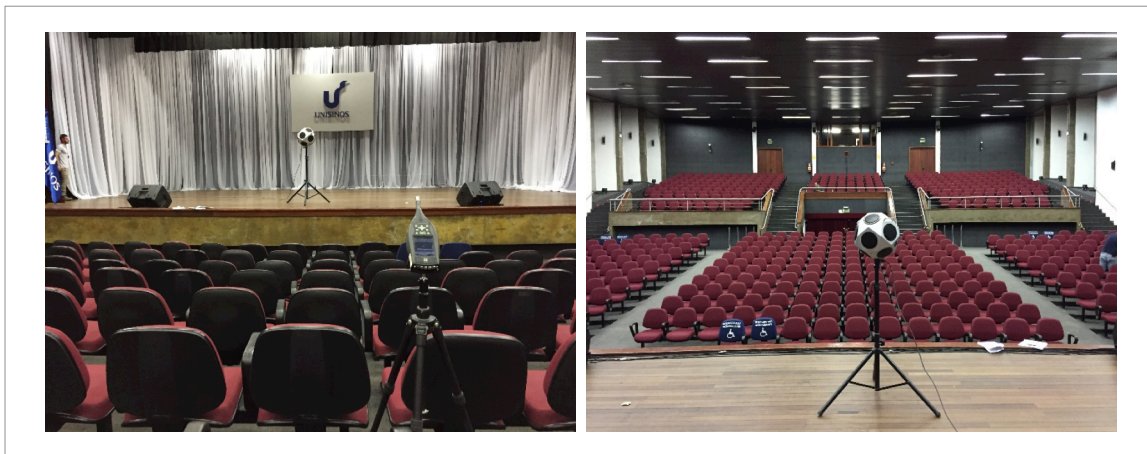


Figura 4. Ejemplo del procedimiento de medición: Fuente de sonido Omnipower en la posición de Fuente 1 y Analizador de sonido en la posición de medición 9(Ver Figura 2)

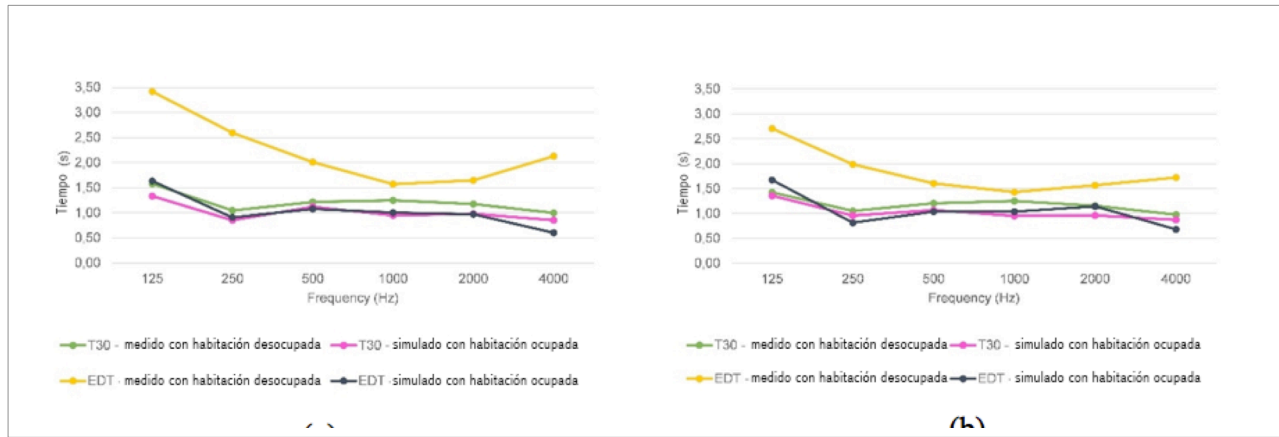


Figura 5. T30 y EDT: (a) Fuente 1 y (b) Fuente 2

El análisis de los parámetros relacionados con la inteligibilidad del habla (D50 e ITS) muestra mejores resultados en las primeras filas de asientos y en algunas posiciones cerca de las superficies reflectoras y presenta resultados satisfactorios en otras áreas de asientos en el nivel inferior del auditorio (Figura 6). En el nivel superior, los valores fluctúan ampliamente, aunque aún están por debajo del comportamiento acústico satisfactorio para la inteligibilidad de la voz. Esta diferencia ocurre porque los asientos del nivel superior están bastante lejos del escenario, lo que causa que el sonido que viene de las reflexiones de las superficies internas de la habitación recorra distancias más largas para llegar al receptor, comprometiendo la inteligibilidad.

El mapeo del parámetro C80, utilizado en la evaluación de las habitaciones para presentaciones musicales presentó valores altos no homogéneos en toda la habitación (Figura 6). Para la buena calificación de una habitación en la que se desee realizar presentaciones de orquestas musicales, es importante que todos los asientos presenten condiciones satisfactorias. Por lo tanto, los valores de C80 deben ser más bajos que los obtenidos y el tiempo de reverberación de la habitación debe ser más alto, dando a la habitación un campo reverberante más denso y una mejora en los aspectos subjetivos tales como textura, timbre y calidad tonal del sonido musical.

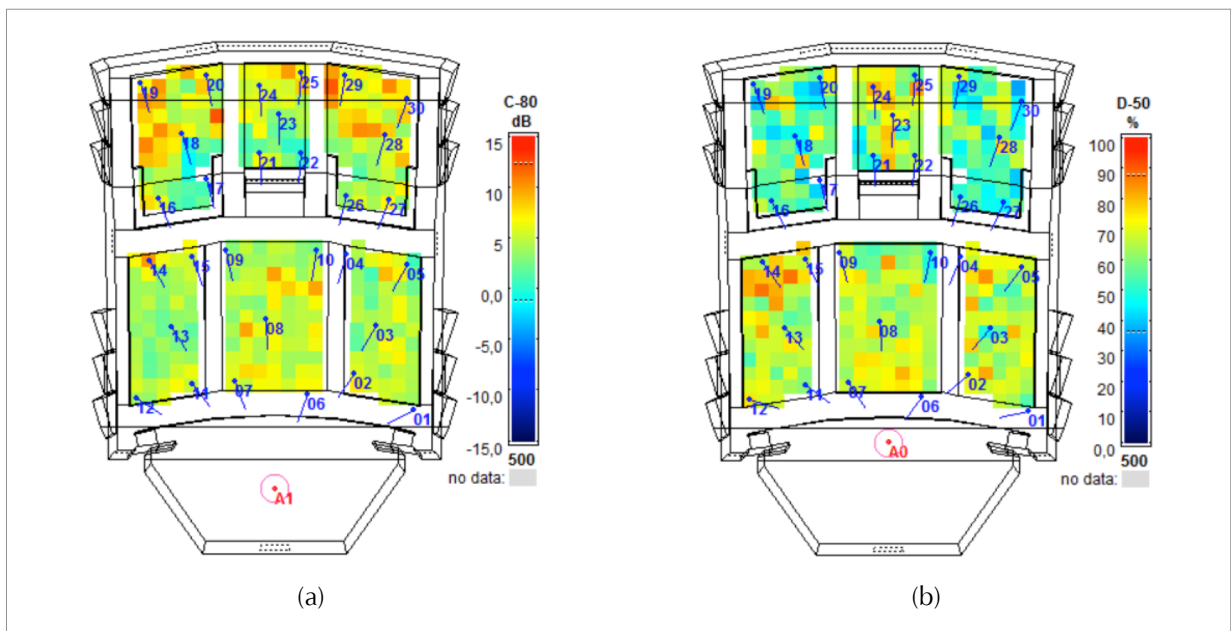


Figura 6. Mapeo acústico: (a) C80 y (b) D50

Ya que el auditorio Padre Werner no presenta un comportamiento acústico satisfactorio para presentaciones musicales, se simuló la aplicación de soluciones constructivas que apunten a mejorar su calidad a través del software de simulación acústica CATT-Acoustics. Para alcanzar un tiempo de reverberación más alto en la habitación, se propuso una elevación de 80 cm del revestimiento principal, aumentando el volumen de la habitación y reduciendo la absorción en las frecuencias bajas promovida por la separación entre el revestimiento y el cielorraso. Esta elevación también tenía el propósito de cortar la caída de T30 en la banda de 250Hz, porque la separación sobre el revestimiento hace que este funcione como un silenciador de resonancia. La cubierta de la pared trasera de alfombra fue remplazada por difusores de madera tipo QRD, reduciendo la absorción de esta superficie y otorgando reflexiones difusas, que ayudan a evitar ecos y fortalecen el campo reverberante. Sobre las puertas que se encuentran en las paredes laterales del centro de la habitación, se propuso la instalación de paneles difusores de madera QRD para mejorar la distribución del sonido dentro de la habitación.

En el escenario, el arco del proscenio se puede eliminar y se puede instalar una concha acústica, removiendo el cortinaje de cierre y aumentando el área de exposición del escenario, dirigiendo el sonido a la audiencia de manera más amplia (Figura 7). Para la composición de la concha, se propuso la instalación de paneles difusores de madera convexos montados sobre marcos de aluminio en las paredes laterales y la parte trasera del escenario y la instalación de

paneles planos de madera suspendidos formando una superficie convexa en el revestimiento escénico.

Sin embargo, debido a que el auditorio se utiliza para distintos propósitos, es necesario atribuir elementos que aumenten la absorción del sonido y dirijan las primeras reflexiones a la audiencia, reduciendo así el tiempo de reverberación y aumentando la definición del sonido para ajustar el comportamiento acústico de la habitación para actividades de habla.

Como en los auditorios de habla las reflexiones de las paredes laterales no son una prioridad, ya que pueden interferir con la ubicación de la fuente de sonido, se propuso la instalación de cortinas de doble capa motorizadas (una capa de lana y otra de acolchado) frente a las hendiduras de las paredes laterales, reduciendo el tiempo de reverberación. Para dar apoyo al sonido directo y aumentar la definición del sonido, se modelaron tres series de 4 x 3 m (cuatro veces la longitud de onda para la frecuencia de 500 Hz), fijadas en el cielorraso. Como el presente estudio de caso tiene el propósito de evaluar la calidad acústica del objeto de estudio para fuentes de sonido naturales sin el uso de refuerzo de sistemas de sonido y ya que los asientos que se encuentran en el nivel superior se encuentran a una distancia superior a la recomendada para este propósito, los paneles fueron modelados para dirigir las primeras reflexiones a los asientos del nivel inferior. La Figura 8 (a) muestra las soluciones aplicadas para mejorar la calidad para presentaciones artísticas y la Figura 8 (b) ilustra los elementos móviles utilizados para adaptar la habitación para las actividades de habla.

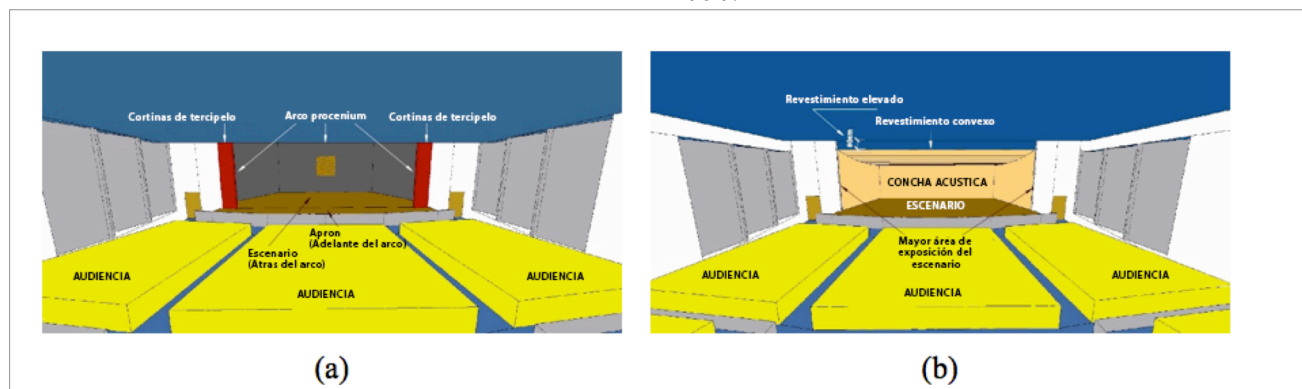


Figura 7. Esquemas del escenario: (a) original y (b) configuración nueva

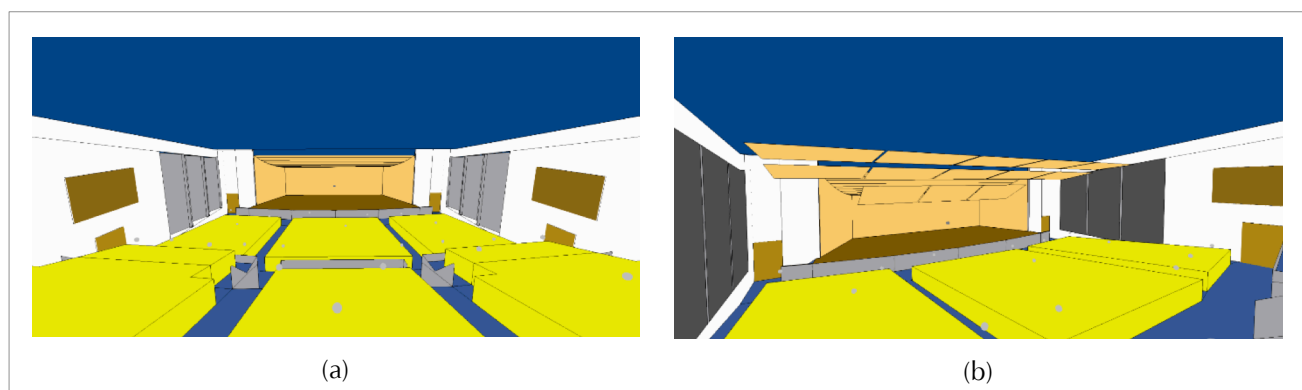


Figura 8. Soluciones constructivas propuestas: (a) para actividades musicales y (b) para actividades de habla

Luego de la simulación del comportamiento acústico del auditorio incluyendo las soluciones propuestas, es posible ver que el tiempo de reverberación puede tener un aumento considerable en las frecuencias medias y bajas, alcanzando 1,5 s en la banda de 500 Hz (Figura 9). El comportamiento de

la curva como una función de las frecuencias también mejoró con un aumento gradual en las frecuencias bajas cortando la disminución en la banda de 250 Hz causada por el espacio sobre el revestimiento principal.

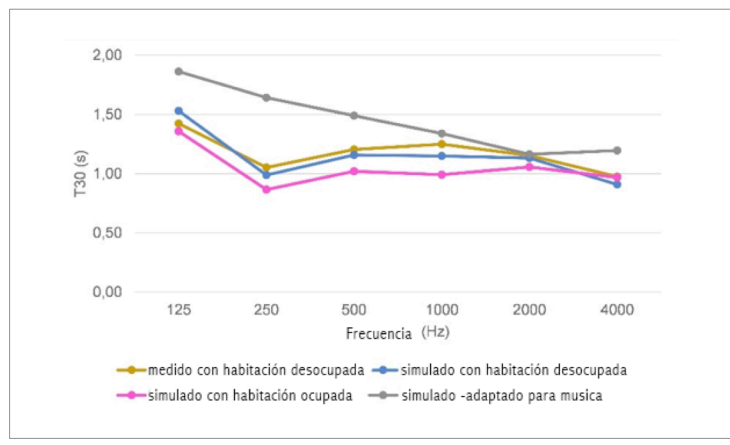


Figura 9. Tiempo de reverberación en las situaciones analizadas con la fuente de sonido 2

Mediante el análisis del mapeo de C80 antes y después de la aplicación de las soluciones constructivas, que se muestra en las Figuras 6 y 10, puede verificarse que los valores son cercanos al ideal debido a la reducción del tiempo de reverberación. Además de este factor, las modificaciones también promovieron una distribución más uniforme del sonido en la habitación debido a la aplicación de dispositivos de difusión, presentando condiciones acústicas similares para todos los asientos. Estos datos muestran que las soluciones propuestas presentaron mejoras en la calidad acústica de la habitación para presentaciones musicales.

Centrándose en la calidad acústica de la habitación para el habla, la comparación de las Figuras 6 y 10 muestran un aumento en los valores de D50 para los asientos del nivel inferior con la simulación de las soluciones constructivas para las primeras filas de asientos. Este aumento está asociado con la instalación de los paneles reflectores sobre la fuente de sonido, que dirige las primeras reflexiones a la

audiencia en un breve periodo y con suficiente energía, promoviendo apoyo directo del sonido y un aumento de la inteligibilidad del aula. Estos resultados sugieren que es posible asignar a la habitación las soluciones constructivas que permitan adaptar el tiempo de reverberación a diferentes actividades, considerando que las soluciones propuestas para el habla fueron implantadas en el mismo modelo que promovió mejoras en la calidad acústica de la habitación para las presentaciones musicales.

En la Figura 11 se verifica que el tiempo de reverberación se ajusta a los mejores valores en las frecuencias medias y altas. La similitud entre los valores obtenidos para las bandas de octava entre los 250 Hz y los 4 kHz indica que la absorción de la habitación está bien distribuida para este propósito. Es posible verificar que la curva T30 luego de la aplicación de las soluciones constructivas se comportó de forma análoga a la habitación original y en la banda de los 500 Hz hubo incluso una reducción de 0,9 s.

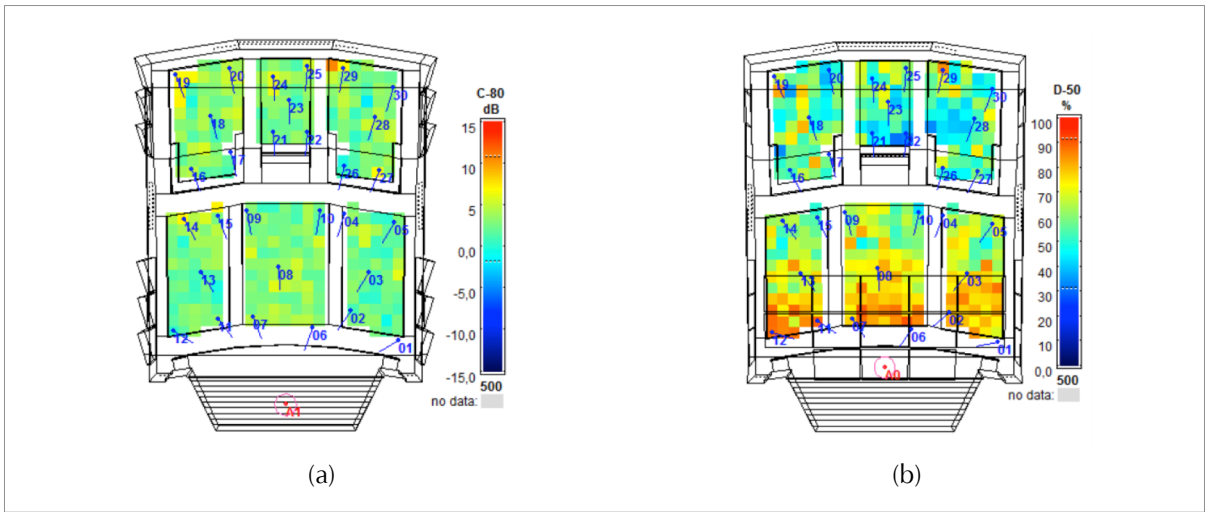


Figure 10. Mapping after the simulation of the constructive solutions (a) C80 and (b) D50



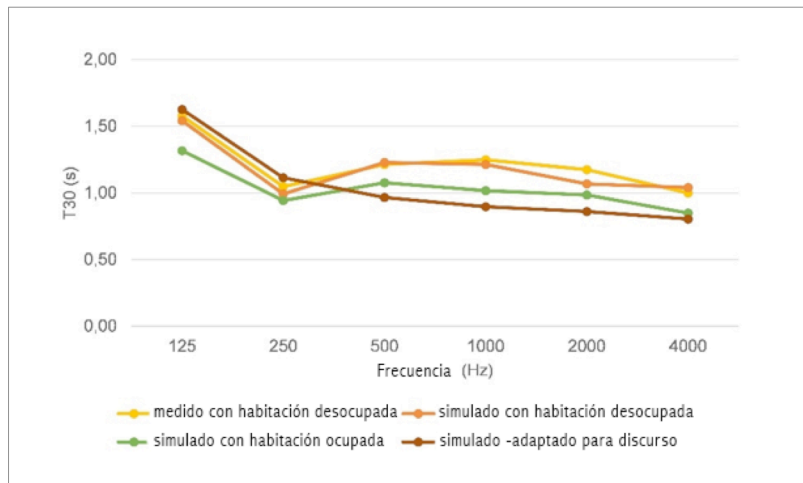


Figura 11. Tiempo de reverberación en las situaciones analizadas con la fuente de sonido 1

5. Conclusiones

El análisis de la calidad acústica del auditorio Padre Werner presentó una complejidad asociada con el hecho de que este ambiente acoge varias actividades, tanto musicales como de habla. Debido a que cada una de estas actividades demanda un tratamiento acústico diferente dentro del recinto, se volvió necesaria una evaluación específica del objeto de estudio para los distintos propósitos.

A partir del análisis obtenido a través de las mediciones y de las simulaciones computacionales realizadas desde el software de simulación acústica CATT-Acoustics, se verificó que el tiempo de reverberación de la habitación desocupada presenta valores superiores a lo esperado para el habla y bien por debajo de lo recomendado para las presentaciones musicales, según las referencias consultadas para este estudio. Considerando la absorción proporcionada por la presencia de audiencia, los valores del tiempo de reverberación sufrirían una reducción significativa, cayendo dentro del rango de valores recomendado para habitaciones de habla y desfavoreciendo aún más el ambiente acústico para las presentaciones musicales.

Los valores estimados para los parámetros D50 e ITS muestran una buena inteligibilidad del habla para una parte sustancial de los asientos. Sin embargo, debido a las dimensiones de la habitación se llegó a la conclusión de que las mejores condiciones acústicas para el habla, sin considerar el refuerzo de sistemas de sonido, se obtienen ocupando solamente los asientos del nivel inferior de la habitación, ya que las largas distancias entre el orador y los asientos del nivel superior provocan que el sonido se atenúe para los oyentes, comprometiendo así la transmisión del mensaje de sonido.

7. References

- Adelman-Larsen N. W. (2014), Auditorium Acoustics: Terms, Language, and Concepts, in *Rock and Pop Venues*. Berlin: Springer Berlin, pp. 25–34. doi: 10.1007/978-3-642-45236-9_2.
- Alam S. F., Rafat Y. and Bilgrami H. (2016), Acoustical analysis of Aligarh Muslim Universitys central auditorium, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 28(1) 15021. doi: 10.1121/2.0000438.
- Barron M. (2010), *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Abington, Oxon, UK: Spon Press.

Debido a los bajos valores en el tiempo de reverberación, el mapeo de la C80 presentó valores bien por sobre lo recomendado para salas de música orquestal, además de presentar grandes variaciones en los resultados en los asientos. Ya que en las salas de concierto se desea que el tiempo de reverberación sea más alto y que la claridad (C80) sea reducida, se llegó a la conclusión de que el auditorio Padre Werner no tiene una calidad acústica satisfactoria para este propósito.

A partir de los resultados obtenidos en la simulación de las soluciones constructivas propuestas en el software de simulación acústica CATT-Acoustics, se verificó que la aplicación de las soluciones propuestas permitiría una mejora considerable en los parámetros objetivos utilizados para evaluar la calidad acústica de la habitación para actuaciones musicales, aunque no logra los resultados deseados para este propósito. Sin embargo, los elementos móviles utilizados en este mismo modelo para adaptar la habitación para actividades de habla han entregado un tiempo de reverberación que se ajusta a las recomendaciones, además de entregar una buena inteligibilidad del habla que se demostró por los altos valores estimados para el los parámetros D50 e ITS. Por lo tanto, se concluye que el auditorio Padre Werner tiene una mejor calidad acústica para el uso en actividades de habla que para las presentaciones musicales, aunque se utilice para ambos propósitos.

6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo de las agencias brasileñas CAPES, CNPq y Fapergs, que proporcionaron el financiamiento para esta investigación.

- Barron M. and Kissner S. (2017)**, A possible acoustic design approach for multi-purpose auditoria suitable for both speech and music, *Applied Acoustics*, 115: 42–49. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003682X16302420>.
- Beranek L. (2004)**, *Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag.
- Brandão E. (2016)**, *Acústica de salas: projeto e modelagem*, Edgard Blücher. São Paulo: Edgard Blücher. Available at: https://www.arauacustica.com/files/noticias/pdf_esp_1223.pdf.
- Brill L. L. C., Blevins M. G. M. and Wang L. M. (2014)**, Analysis and virtual modification of the acoustics in the Nebraska Wesleyan University campus theatre auditorium, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(4): 2126–2126. doi: 10.1121/1.4899657.
- Coffeen R. C. (2014)**, Directing room acoustic decisions for a college auditorium renovation by using auralization, *The Journal of the Acoustical Society of America*. Acoustical Society of America, 136(4): 2090–2090. doi: 10.1121/1.4899508.
- Garrido J. A., Zamarreño T. and Girón S. (2012)**, Virtual models for the prediction of acoustic fields of Manuel de Falla Auditorium in Granada, Spain, *Applied Acoustics*. Elsevier, 73(9): 921–935. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X12000709>.
- Groendyke B. and Gipson K. (2015)**, Acoustic response of a multipurpose auditorium at Grand Valley State University, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(3): 1901–1901. doi: 10.1121/1.4933975.
- Guthrie A. et al. (2017)**, Contemporary multi-use concert hall design: Experience and analysis, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(5): 3498–3498. doi: 10.1121/1.4987318.
- Henrique L. L. (2009)**, *Acústica Musical*. 3rd ed. Lisboa: Fundação Galouste Gulbenkian.
- ISO (2009)**. ISO 3382-1:2009. Acoustics- Measurement of Room Acoustic Parameters-Part 1: Performance spaces. ISO. 26p.
- Jambrošić K., Domitrović H. and Horvat M. (2016)**, The Acoustics of a Multifunctional Concert Hall in Zagreb, in *EuroRegio2016*. Porto, pp. 1–10. Available at: http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/75_01.pdf (Accessed: 9 December 2017)..
- Jeon J. Y., Jang H. S. and Lim H. (2016)**, Design consideration of sound diffusers for wall surfaces in concert halls, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(4): 2114–2114. doi: 10.1121/1.4950288.
- Jeon J. Y., Kim J. H. and Ryu J. K. (2016)**, The effects of stage absorption on reverberation times in opera house seating areas, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(3): 1099–1107. doi: 10.1121/1.4913772.
- Kahle E. (2013)**, Room Acoustical Quality of Concert Halls: Perceptual Factors and Acoustic Criteria - Return from Experience, *Building Acoustics*, 20(4): 265–282. doi: 10.1260/1351-010X.20.4.265.
- Long M. (2006)**, *Architectural acoustics*. Burlington MA: Elsevier Academic Press.
- Lu S. et al. (2016)**, Improving auditorium designs with rapid feedback by integrating parametric models and acoustic simulation, *Building Simulation*, 9(3): 235–250. doi: 10.1007/s12273-015-0268-x.
- Mahalingam G. (2017)**, Generating the spatial forms of auditoriums based on distributed sentence, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(5): 3710–3710. doi: 10.1121/1.4988112.
- Mak C. M. and Wang Z. (2015)**, Recent advances in building acoustics: An overview of prediction methods and their applications, *Building and Environment*, 91: 118–126. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.03.017.
- Mourjopoulos J. (2016)**, The origins of building acoustics for theatre and music performances, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(4): 2427–2427. doi: 10.1121/1.4920853.
- Navvab M. and Heilmann G. (2017)**, Measured and simulated room acoustic characteristics in three concert halls with unique architectural geometry using beamforming techniques, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(5): 3779–3780. doi: 10.1121/1.4988315.
- Ortega G. V. and Rivera J. I. S. (2013)**, Acoustic Study of the Manuel de Falla Auditorium: Design Evolution and Acoustic Simulation, *Journal of Basic and Applied Physics*, 2(4): 211–223.
- Ortiz S. M. (2016)**, Auditorio 400 at the “Museo Reina Sofía” in Madrid: Use of variable systems for acoustic improvements, *Building Acoustics*, 23(3–4): 159–179. doi: 10.1177/1351010X16671525.
- Ricciardi P. and Buratti C. (2018)**, Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions, *Building and Environment*, 127: 23–36. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.10.030.
- Rossing T. D. (2007)**, *Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer Science and Business Media. doi: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- Rudno-Rudziński K. and Dziechciński P. (2006)**, Reverberation time of Wrocław Opera House after restoration, *Archives of Acoustics*, 31(4) : 247–252. Available at: <http://acousticsnew.ippt.pan.pl/index.php/aa/article/download/1350/1170>.
- Szeląg A. and Flaga A. (2015)**, An acoustic study of the auditorium hall to be located in the proposed building of the Applied Acoustics Laboratory of Cracow University of Technology, *Technical Transactions Civil Engineering*, 12(2–B): 343–357. doi: 10.4467/2353737XCT.15.142.4179.
- Vorländer M. (2007)**, *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Berlin: Springer-Verlag.
- Wenmaekers R. et al. (2017)**, Methods to measure stage acoustic parameters: Overview and future research, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(5): 3498–3498. doi: 10.1121/1.4987319.
- Witew I. B. and Vorländer M. (2016)**, Sampling the sound field in auditoria using a large scale microphone array, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(4): 3128–3128. doi: 10.1121/1.4969795.