

Reflexiones tempranas de sonido y calidad acústica en el Palacio de los Deportes

Early sound reflections and the acoustic quality of the Palacio de los Deportes

Resumen

En el Palacio de los Deportes de Ciudad de México los asistentes y los artistas perciben lo que califican como “rebotes de sonido” que demeritan la calidad acústica. El objetivo de este trabajo es determinar las características arquitectónicas y acústicas que causan estas deficiencias, ya que hasta ahora no se había realizado ningún estudio científico al respecto. El presente reporte técnico muestra los resultados de una simulación acústica complementada con mediciones *in situ*. Mediante el método de trazado de rayos se identifican reflexiones tempranas de sonido características de la arquitectura del recinto y se evalúa el efecto de estas reflexiones en la percepción de la calidad acústica de acuerdo con criterios psicoacústicos.

Palabras clave: auditorio, reverberación, eco, calidad acústica, música rock y pop

Abstract

In the Palacio de los Deportes, in Mexico City, both attendees and artists report what they perceive to be "sound echoes," in detriment to the acoustic quality. The objective of this paper is to determine the acoustic and architectural characteristics that are causing these deficiencies given that, until now, no scientific study has been carried out in this regard. This technical report provides the results of an acoustic simulation, complemented with in situ measurements. Using acoustic ray tracing, early sound reflections are identified due to a particular characteristic of the architecture, and the effect of these early sound reflections on the perceived acoustic quality is evaluated, based on psychoacoustic criteria.

Keywords: music venue, reverberation, echo, acoustic quality, rock and pop music

Ángel Eduardo Arellano Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México

Felipe Orduña Bustamante

Universidad Nacional Autónoma de México

Fecha de recepción:
28 de abril de 2023

Fecha de aceptación:
24 de abril de 2024

<https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2024.15.29.88665>



Este trabajo está amparado por una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial, 4.0

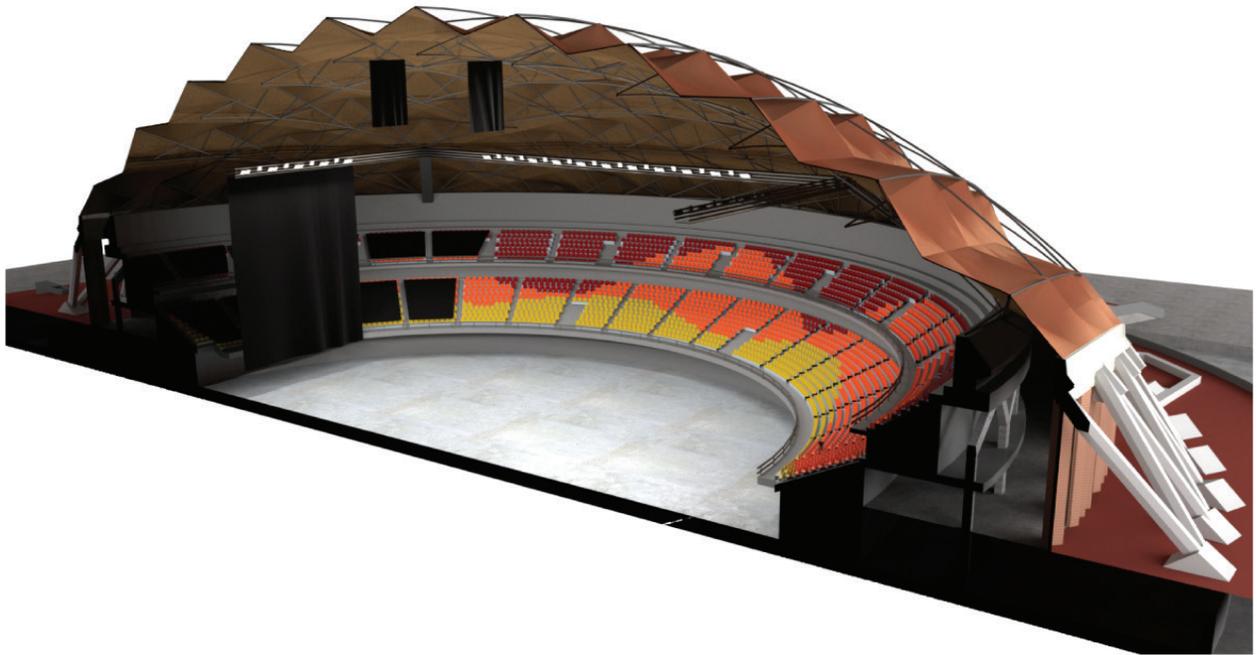
El Palacio de los Deportes “Juan Escutia”, o “Domo de Cobre”, es un recinto icónico de la arquitectura en Ciudad de México. Su diseño fue el trabajo de los arquitectos Félix Candela, Antonio Peyri y Enrique Castañeda. Se construyó en 1968 con el propósito de realizar ahí los eventos deportivos de baloncesto de los Juegos Olímpicos de ese año.

El recinto tiene una cúpula conformada por paraboloides hiperbólicos. Se trata de una cúpula ligera de 50 kg por m² compuesta por madera contrachapada de 38 mm en la parte interna, impermeabilizante asfáltico en la parte intermedia y en la parte externa láminas de cobre de 9.76 mm. Esta cúpula de cobre es el elemento característico del edificio y se sostiene por armaduras de arcos de acero, que a su vez se apoyan en contrafuertes de hormigón armado y en tirantes de tubo. Alrededor de la cúpula tiene muros de ladrillo en forma de zigzag. Las gradas de concreto se dividen en tres niveles, el inferior para servicios, logística y medios; el principal para vestíbulos y acceso a la gradería baja; finalmente, el nivel superior es destinado para palcos y acceso a la gradería media y alta. En la parte central se encuentra la pista hecha de concreto pulido. Considerando la pista y las gradas se cuenta con una capacidad para 22,000 personas con 19,824 asientos.¹

Al finalizar los juegos olímpicos de 1968, el lugar se utilizó para eventos esporádicos como algunas ferias, corridas de toros, exposiciones, etc. A finales de la década de 1980 comenzaron a realizarse conciertos con artistas internacionales iniciando con la agrupación de *rock* INXS. Lo anterior sucedió cuando el gobierno de la ciudad otorgó la concesión del recinto a la empresa de espectáculos OCESA. Los asistentes a los conciertos, además de los artistas, de inmediato notaron dificultad para entender la música y las letras de las piezas musicales. Reportaban ecos o rebotes de sonido en el área de la pista y las gradas en numerosos conciertos. En consecuencia, al Palacio de los Deportes el público le comenzó a llamar “Palacio de los Rebotes”. Se han realizado intentos por resolver este efecto colgando algunas telas del domo, con lo cual se ha conseguido reducirlo. Sin embargo, el efecto continúa en la actualidad.

La acústica arquitectónica establece que el comportamiento del sonido dentro de un recinto cerrado depende de su volumen, sus materiales y sus formas geométricas. Por lo tanto, las posibles causas o explicaciones de la reverberación y del eco reportado por los asistentes pueden ser la geometría de la cúpula y la forma circular de las gradas. Además, los principales materiales que

¹ F. Candela Outeriño, A. Peyri Macía y E. Castañeda Tamborrell, “Palacio de los Deportes”, *Informes de la Construcción*, vol. 21, núm. 205, noviembre, 1968, pp. 6-12, <https://doi.org/10.3989/ic.1968.v21.i205.3796>.



componen el interior del recinto son madera en la parte interna de la cúpula y concreto en pista y gradas. Por otro lado, no sólo la arquitectura del lugar interviene en la calidad acústica, sino también la manera en que se sonoriza el recinto. Con esto se habla de cantidad de altavoces, sus posiciones, su tipo, ecualización, etc. En conjunto, tanto la arquitectura como la tecnología de sonorización juegan un papel importante en la calidad acústica de los conciertos. Todo ello conforma un verdadero reto, ya que recordemos que el Palacio de los Deportes no fue diseñado para tales propósitos.

El objetivo de este reporte es identificar los elementos arquitectónicos que causan el largo tiempo de reverberación y los ecos que demeritan la calidad acústica del recinto mediante un análisis exhaustivo de las mediciones y simulaciones acústicas, ya que hasta ahora no se había realizado ningún estudio acústico científico o diagnóstico técnico completo del Palacio de los Deportes. Como consecuencia, al cumplir el objetivo de este trabajo, se tendrá los elementos necesarios para posteriormente realizar una propuesta de acondicionamiento para mejorar la calidad acústica del Palacio de los Deportes de Ciudad de México.

La hipótesis es que la geometría del Palacio de los Deportes genera reflexiones de sonido que causan las impresiones subjetivas del mal desempeño acústico reportado por el público asistente.

Figura 1. Representación de corte en 3D del Palacio de los Deportes de Ciudad de México.

Fuente: modelo 3D elaborado por los autores.

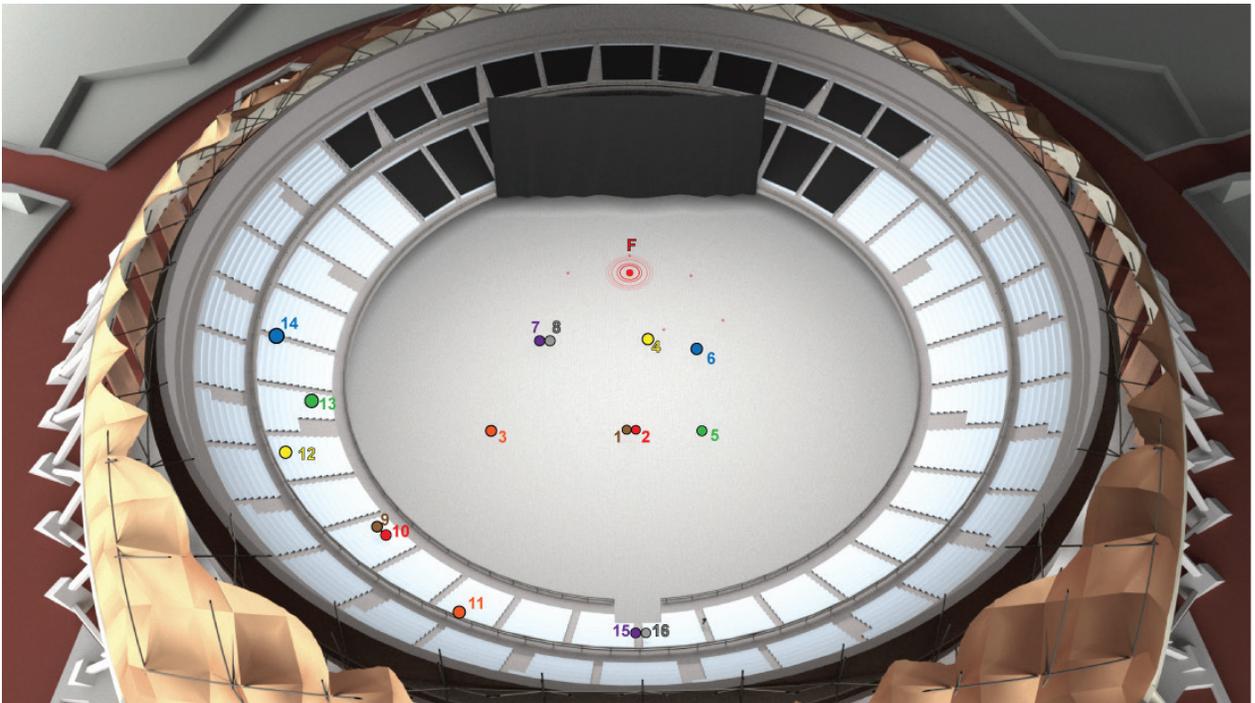
Metodología

Con el objetivo de obtener el tiempo de reverberación, los índices de calidad acústica y un ecograma se realizaron mediciones *in situ* con micrófonos y fuentes omnidireccionales. En un ecograma se representan la intensidad en el eje vertical y el tiempo en el que llega al receptor tanto el sonido directo como los reflejos de sonido en el eje horizontal. Como fuente de sonido se utilizó una claqueta de madera para generar el impulso sonoro. Se utilizaron ocho micrófonos en el área de la pista y ocho más en el área de las gradas. Es importante mencionar que al momento de realizar mediciones se encontraban en el recinto lonas de tela a manera de telón y otras cubriendo una parte de la gradería. Por lo cual, también se consideraron estos aspectos en la simulación.

El objetivo de la simulación es encontrar las superficies que generan ecos no deseables y focalizaciones de sonido, además de generar un ecograma para compararlo con el obtenido en las mediciones. La simulación de trazado de rayos se realizó por medio del programa Rhinoceros v7 con el *plug-in* Pachyderm y el modelo arquitectónico en 3D se elaboró con Autocad.

Figura 2. Ubicación de fuentes y receptores para la medición y la simulación.

Fuente: modelo 3D elaborado por los autores.



En la simulación se utilizaron micrófonos (virtuales) de la misma manera en cuanto a número y colocación que en las mediciones *in situ*. El análisis se limita a un cierto número de rayos y a las reflexiones de primer orden. Es decir, a los rayos que se emiten de la

fuente y se reflejan una sola vez en alguna superficie para incidir en el micrófono seleccionado. Estos “rayos acústicos” y sus reflexiones de primer orden suceden dentro de los primeros 400 ms. El programa indica gráficamente el lugar donde ocurren estas reflexiones y genera un ecograma o curva ETC (Energy Time Curve)². El ecograma indica la magnitud de cada reflexión, así como el tiempo en el que ocurren. En el presente reporte se presentan los resultados para un micrófono en la pista y un micrófono en las gradas como una muestra representativa de la información más exhaustiva que puede obtenerse de los 16 micrófonos.

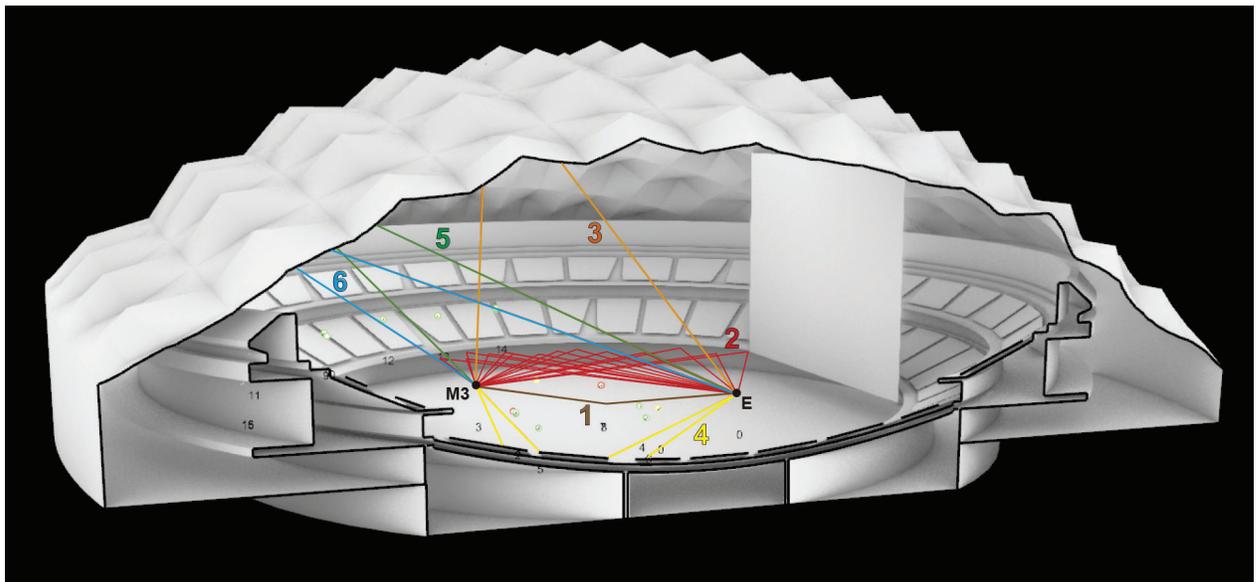
Resultados

En la parte superior de la Figura 3 se observa el modelo 3D con los rayos representando los reflejos de sonido. Estos son los reflejos de primer orden que recibe el micrófono 3 ubicado en la pista. En la parte inferior se muestra el ecograma o gráfica ETC, en donde cada línea vertical representa una reflexión y cada punto de color en la gráfica representa los reflejos de primer orden mostrados del mismo color en el modelo 3D. Estos reflejos de primer orden son los que presentan una mayor amplitud, lo cual significa que llegan al micrófono con mayor intensidad.

La distancia lineal entre la fuente y el micrófono 3 es de 37.528 m, por lo que el tiempo estimado de llegada del sonido directo es de 109 ms, creando una diferencia de 1 ms con el primer reflejo.

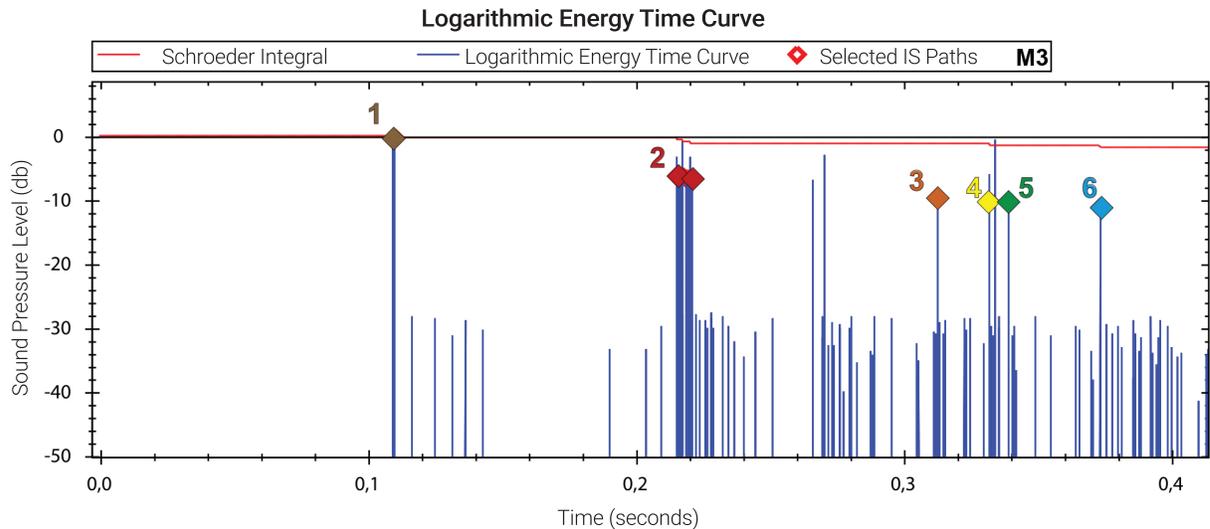
Figura 3. Análisis de reflejos y ecograma del micrófono 3 ubicado en la pista.

Fuente: elaborado por los autores.



(Continúa en pág. sig.)

² Don Davis y Joe Martinson, “Using basic energy time curve (ETC) measurements”, 66th Convention, May 6 through 9, 1980, Los Angeles, Audio Engineering Society, 1980.



Con lo anterior se deduce que el sonido directo y el primer reflejo llegan prácticamente al mismo tiempo desde un punto de vista perceptual. En la Figura 4 se identifican los reflejos y sus características, tanto de la simulación como de la medición *in situ*. Gracias a la simulación se puede identificar el origen de cada reflexión. Las diferencias de nivel son relativamente pequeñas entre la simulación y la medición. Es importante mencionar que estas reflexiones de primer orden son las que definen subjetivamente cómo se percibe la claridad y la inteligibilidad del sonido dentro del recinto.

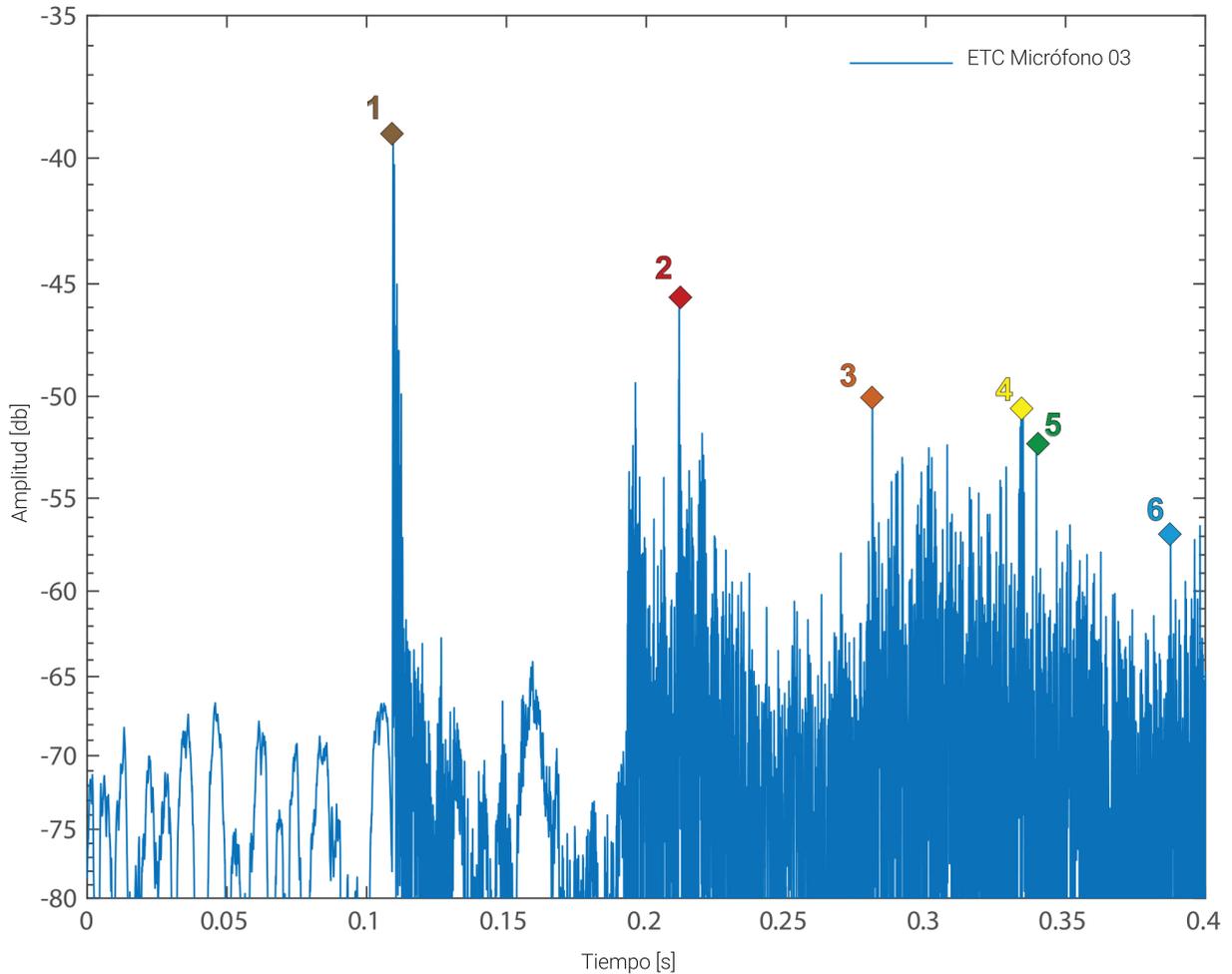
La Figura 5 muestra el ecograma de la medición real en donde se observa un patrón de reflejos similar al obtenido en la simulación, por lo que resulta posible identificar el origen de cada reflejo.

(Viene de pág. ant.)

Figura 4. Parámetros de reflexiones del micrófono 3 obtenidos en la simulación y la medición *in situ*.

Fuente: elaborado por los autores.

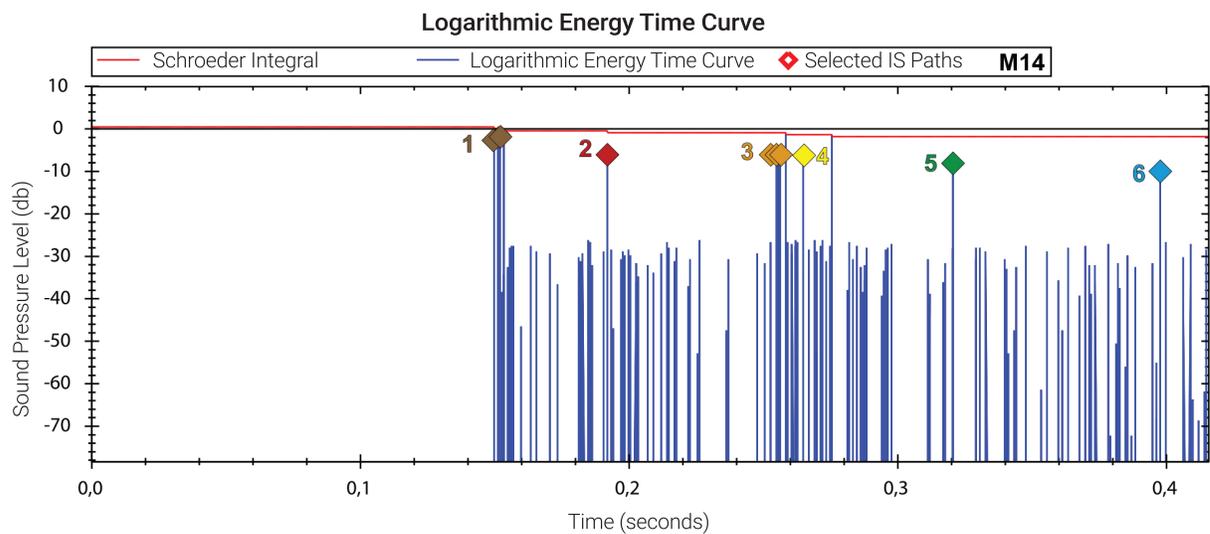
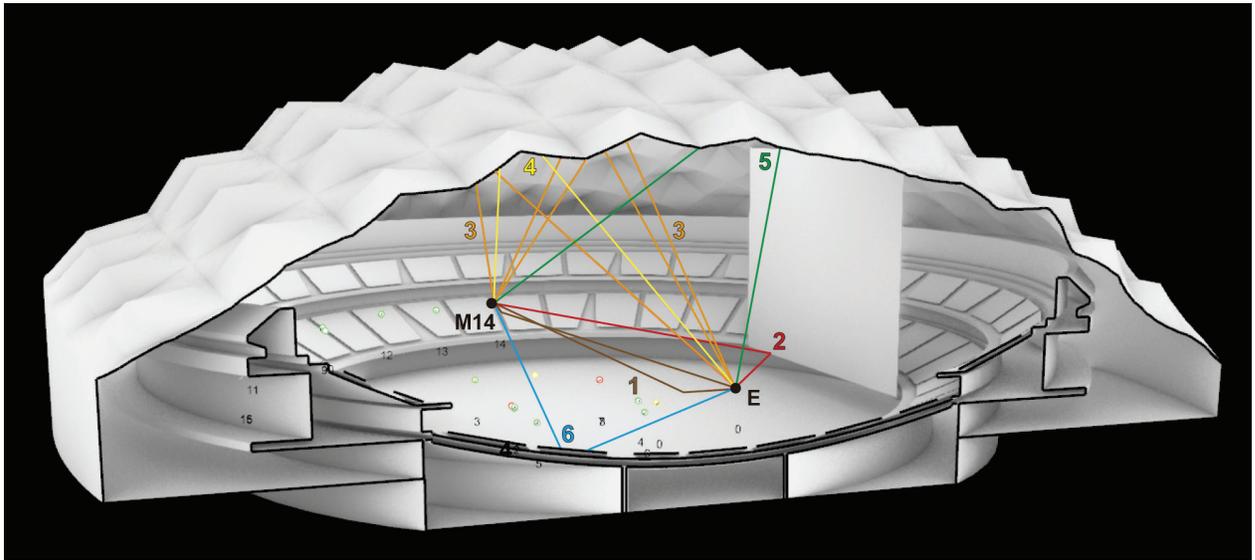
Micrófono 3 ubicado en la pista					
Reflejo	Simulación		Medición <i>in situ</i>		Origen del reflejo
	Diferencias de tiempo (ms)	Diferencias de nivel (dB)	Diferencias de tiempo (ms)	Diferencias de nivel (dB)	
0	0	0	0	0	Sonido directo
1	0.9	0	1	-6	Piso de la pista
2	109.0	-6	102	-6	Parte más cercana del muro perimetral
3	200.9	-9	171	-11	Parte alta de la cúpula
4	220.9	-10	225	-11	Parte más lejada del metro perimetral
5	230.9	-10	230	-13	Parte baja de la cúpula
6	260.9	-11	278	-18	Parte baja de la cúpula



En la Figura 6 se analizan las reflexiones de primer orden para el micrófono 14, ubicado en las gradas. La distancia lineal entre la fuente y el micrófono 14 es de 51.767 m, por lo que el tiempo estimado de llegada del sonido directo es de 150.5 ms, existiendo una diferencia de 0.5 ms aproximadamente con el primer reflejo. Al igual que en el micrófono 3 en la pista, se puede considerar que el sonido directo y el primer reflejo llegan prácticamente al mismo tiempo desde un punto de vista perceptual, ya que la diferencia es menor a 1 ms. En la Figura 7 se identifican los reflejos y sus características. En este caso, la distancia entre el primer reflejo y el segundo es de 39 ms con una diferencia de nivel sonoro de -6 dB.

Figura 5. Ecograma de medición *in situ* del micrófono 3 ubicado en la pista.

Fuente: elaborado por los autores.



Comparando los valores entre la simulación y la medición *in situ* de la Figura 7 se observa una notable similitud en el tiempo entre los reflejos. Los datos muestran cierta semejanza en cuanto al tiempo y los niveles excepto el reflejo número 2, el cual tiene su origen en la lona. Esta diferencia podría explicarse a que en la realidad la lona absorbe cierta cantidad de la energía de esta reflexión. En cambio, en la simulación, el método de trazado de rayos ignora esta característica acústica del material. En la realidad se observan algunas reflexiones adicionales en comparación con la simulación, las cuales podrían ser originadas por las butacas, que no se incluyeron en la simulación.

Figura 6. Análisis de reflejos y ecograma del micrófono 14 ubicado en las gradas.

Fuente: elaborado por los autores.

Micrófono 4 ubicado en las gradas					
Reflejo	Simulación		Medición <i>in situ</i>		Origen del reflejo
	Diferencias de tiempo (ms)	Diferencias de nivel (dB)	Diferencias de tiempo (ms)	Diferencias de nivel (dB)	
0	0	0	0	0	Sonido directo
1	0.5	0	1	-6	Piso de la pista y de gradas
2	39.5	-6	43	-17	Lona de escenario
3	107.5	-6	109	-9	Parte alta de la cúpula
4	114.5	-7	115	-11	Parte alta de la cúpula
5	170.0	-8	177	-15	Parte baja de la cúpula
6	207.0	-10	247	-20	Muro perimetral de gradas

Los reflejos provocan efectos subjetivos en la manera en que se escucha el sonido. Estos efectos pueden ser coloración de tono, efectos de falsa localización de la fuente de sonido, impresión espacial y ecos molestos. Barrón estudió estos efectos subjetivos y se describen en la Figura 9. De acuerdo a su investigación, si los reflejos de la música llegan después de 50 ms con altos niveles de energía se consideran ecos molestos. Estos ecos los ubicamos en la gráfica en el área indicada como "Disturbance". Sin embargo, no todos los reflejos provocan efectos negativos. Los reflejos que llegan después de 10 ms ayudan a la impresión espacial subjetiva del escucha, que se refiere a la sensación de estar envuelto o inmerso en la música. Para tal efecto, se deben localizar dentro de la zona sombreada en donde mientras más oscuro es el sombreado mayor es el efecto de espacialidad.

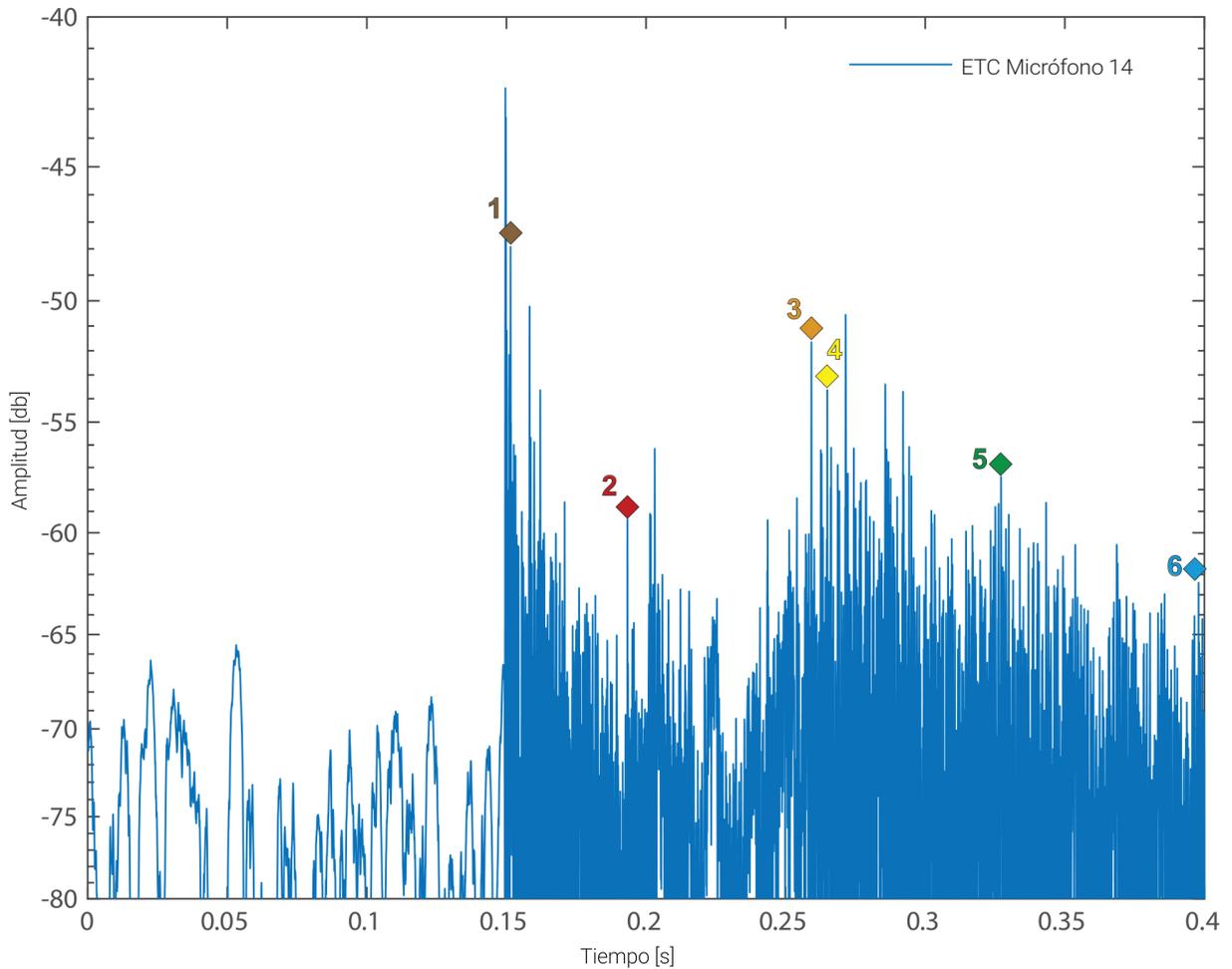
Los círculos rojos indican reflejos en el área de ecos no deseables registrados en la medición y en la simulación. En cambio, los círculos amarillos ubican los reflejos en la zona de ecos deseables después de un tratamiento acústico arquitectónico propuesto, que consiste en agregar difusores y material absorbente, el cual se describe con mayor detalle en la tesis "Diagnóstico acústico del Palacio de los Deportes de la Ciudad de México"³ como una posible solución, indicado como tratamiento F.

Al observar los valores de la Figura 4 del micrófono ubicado en la pista, el segundo reflejo presenta un retardo de 109 ms con un

Figura 7. Parámetros de reflexiones del micrófono 14 obtenidos en la simulación y la medición *in situ*.

Fuente: elaborado por los autores.

³ Ángel Eduardo Arellano Pérez, "Diagnóstico acústico del Palacio de los Deportes de la Ciudad de México", tesis de maestría en Arquitectura, Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2024, https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/NNB5S91JT77BHQELCDNRTJKL8JKAXA59UFX68CGYV8Q6V69MCC-01914?func=full-set-set&set_number=040981&set_entry=000001&format=999.



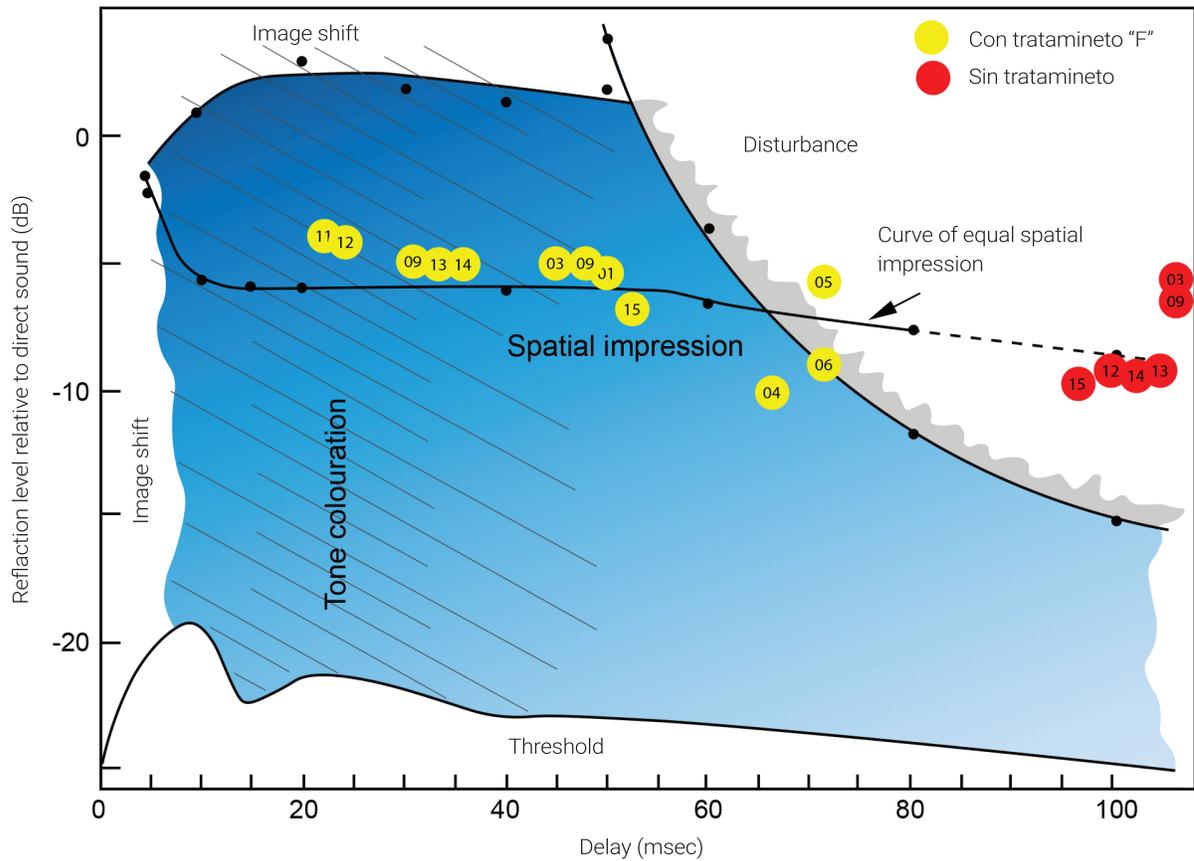
nivel de -6 dB, el cual lo coloca definitivamente en el área de ecos molestos. Los reflejos subsecuentes de la misma tabla se salen del intervalo de tiempo representado en la gráfica con retardos de hasta 398 ms con un nivel de -10 dB, con lo cual, si se extrapola la gráfica, también se encontrarán dentro del área de ecos molestos.

Para el caso del micrófono ubicado en las gradas, cuyos valores de reflejos se encuentran en la Figura 7, el segundo reflejo tiene un retardo de 39 ms con un nivel de -6 dB, con lo cual se trata de un reflejo que ayuda a la espacialidad. Sin embargo, los siguientes reflejos provenientes de la cúpula y del muro de gradas tienen retardos desde 107 ms hasta 247 ms y niveles que van desde -6 dB hasta -10 dB. Por lo tanto, al igual que en la pista, estos reflejos son considerados ecos molestos de acuerdo con la gráfica.

En el caso de la medición, los valores también se encuentran en el área de ecos molestos para el área de la pista. En las gradas, aunque los valores difieren un poco más con los valores simulados, el

Figura 8. Ecograma de medición *in situ* del micrófono 14, ubicado en las gradas.

Fuente: elaborado por los autores.



resultado perceptual es el mismo, situando a los reflejos en el área de ecos molestos.

En la Figura 10 se reportan los valores de tiempo de reverberación (T30) del Palacio de los Deportes de Ciudad de México obtenidos en la medición, en la simulación con el recinto en su estado actual, así como el que se tendría con la propuesta de solución (Propuesta F). Estos valores se comparan con el tiempo de reverberación de recintos de arquitectura y uso similar al del Palacio de los Deportes como el O2 de Londres y el Men Arena de Manchester. Los dos últimos son reconocidos por tener una calidad acústica aceptable, como lo reporta Adelman-Larsen,⁴ en donde también de acuerdo con sus investigaciones se recomienda un tiempo de reverberación de alrededor de 2.5 segundos para recintos del volumen del Palacio de los Deportes.

Un caso de un recinto con un problema similar al del Palacio de los Deportes de Ciudad de México es el del Royal Albert Hall de Londres,⁵ el cual tiene un domo en forma de cúpula de cristal en

Figura 9. Efectos subjetivos de una sola reflexión lateral ($\alpha=40^\circ$) de retardo y nivel variable usando música.

Fuente: elaboración propia basada en M. Barron, "The Subjective Effects of First Reflections in Concert Halls—The Need for Lateral Reflections", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 15, núm. 4, abril, 1971, pp. 475-494, [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90406-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90406-8).

⁴ Niels Werner Adelman-Larsen, *Rock and Pop Venues*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2014, pp. 313, 333, 471, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45236-9>.

⁵ R. Metkemeijer, "The Acoustics of the Auditorium of the Royal Albert Hall before and after Redevelopment", *Auditorium Acoustics 2002*, 2023.

TABLA RESUMEN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS EN RECINTOS				
Recinto	T30 [s] 500-1kHz		Volumen [m ³]	Capacidad [personas]
Palacio de los deportes	Medición	5.76	444,194	22,000
	Simulación	5.86		
	Propuesta "F"	3.30		
O2 Londres	Medición	2.17	400,000	20,000
Men Arena M.	Medición	2.47	250,000	21,000

el centro y las gradas distribuidas de manera circular. Cuando la reina Victoria lo inauguró en 1871, muy pocos asistentes pudieron entender el discurso inaugural debido a los ecos y focalizaciones creadas por la cúpula. Para mitigar ese efecto primero se instaló un "velarium" debajo del domo de cristal pero no tuvo éxito, posteriormente este velarium se colocó a diferentes alturas añadiendo ban,derines en su perímetro, pero tampoco tuvieron un efecto positivo. En 1941 se colocó un reflector de sonido sobre el escenario y se colocó el velarium a una altura del nivel de las gradas, lo cual mejoró la calidad acústica para música orquestal. Ocho años después se cambió todo lo anterior por una cúpula interior de aluminio perforado, lo cual no resultó nada bien. Ya en 1968 se colocaron difusores convexos colgados del domo, llamados "mushrooms", lo cual logró una importante reducción en la intensidad de los ecos además de reducir el tiempo de reverberación. Fue hasta 1996 cuando se construyó un modelo a escala además de un modelo computacional con los cuales se realizaron "auralizaciones", es decir, grabaciones virtuales digitales creadas por el modelo computacional que reflejan cómo se escucha el recinto. Con estas herramientas se pudo escuchar cómo lo escucharon los asistentes el día de la inauguración, además de poder predecir cómo se escuchará al hacer diferentes modificaciones al recinto. Finalmente, se encontró que los ecos eran 20 dB más fuertes que el sonido directo y se encontraron los puntos focales. La decisión final fue conservar los "mushrooms", pero modificando sus alturas, cantidad y distribución. Con esto, además de un efectivo sistema de sonido distribuido, se logró una mejora significativa en la calidad acústica del recinto. Por lo tanto este es un caso de éxito en donde interviene la simulación acústica acompañada de mediciones.

Discusión

La simulación acústica es una poderosa herramienta para visualizar gráficamente cómo se comporta el sonido dentro de un recinto.

Figura 10. Comparativa de tiempo de reverberación (T30) del Palacio de los Deportes con recintos similares.

Fuente: elaborado por los autores.

El método de trazado de rayos ofrece una aproximación muy cercana a los resultados de una medición. La exactitud de los resultados depende también de la exactitud del modelo 3D, así como de los parámetros que alimentan dicha simulación. Por lo tanto, aunque los resultados podrían no ser exactos, nos dan una idea general y muy acertada de lo que está ocurriendo acústicamente con la geometría del lugar. Al incrementar el nivel de detalle del modelo CAD, como por ejemplo tomar en cuenta cada escalón de las gradas, cada butaca, las estructuras tubulares de los arcos, etc., se incrementa enormemente el tiempo de cómputo. El resultado que se pudiera obtener con un nivel de detalle tan elevado no sería muy diferente al que se obtuvo con el nivel de detalle que se observa en las imágenes. De acuerdo a M. Vorländer,⁶ para conocer la exactitud de los resultados de una simulación se deben comparar con las mediciones realizadas en el recinto existente. Por lo anterior, el nivel de exactitud de los resultados depende en gran medida de la exactitud de los datos de entrada, como condiciones atmosféricas, coeficientes de absorción de los materiales, un modelo CAD con las dimensiones exactas del recinto y un nivel de detalle adecuado. De acuerdo a la investigación de Hanna Autio,⁷ se reporta que las incertidumbres relativas asociadas al tiempo de reverberación obtenidas por medio de simulaciones mediante trazado de rayos es de aproximadamente del 4%.

Los resultados aquí presentados son sólo de dos receptores o micrófonos. Sin embargo, el fenómeno es muy similar en los demás receptores que fueron utilizados.

Se debe considerar que en un concierto las fuentes de sonido no se ubican en el mismo punto en que se ubicó la fuente de sonido para esta simulación. En un concierto los altavoces se colocan varios metros arriba y en múltiples y diferentes posiciones que varían con cada presentación. Sin embargo, aunque sí se crearían reflejos con diferentes tiempos e intensidades, la geometría y el volumen del recinto es el mismo. Por lo tanto, los ecos molestos continúan, ya que estos dependen de las dimensiones y formas del recinto.

⁶ Michael Vorländer, "Performance of computer simulations for architectural acoustics", *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA, 2010, Sydney, Australia, 2010*.

⁷ Hanna Autio, Nikolaos-Georgios Vardaxis y Delphine Bard Hagberg, "An Iterative Ray Tracing Algorithm to Increase Simulation Speed While Maintaining Overall Precision", *Acoustics*, vol. 5, núm. 1, marzo, 2023, fig. 9, <https://doi.org/10.3390/acoustics5010019>. (el 14 de marzo de 2023)

Conclusiones

En general, tanto en la pista como en las gradas se tiene una cantidad considerable de reflexiones que afectan negativamente el desempeño acústico del recinto. Tanto la cúpula como el muro perimetral de las gradas causan reflejos de primer orden que por su tiempo de retardo y alta intensidad respecto al sonido directo se pueden caracterizar como ecos molestos, de acuerdo al criterio perceptual de Barrón. Los resultados de la simulación coinciden en gran medida con las mediciones reales.

En conclusión, la geometría y las dimensiones características del Palacio de los Deportes son unas de las causas del mal desempeño acústico percibido por los asistentes. De acuerdo al estudio por el método de trazado de rayos, esta geometría causa focalizaciones y ecos molestos. En la pista esto sucede mayormente debido al muro perimetral y en las gradas sucede en mayor medida a causa del domo en forma de cúpula. Una posible estrategia de acondicionamiento acústico deberá contemplar medidas para reducir los efectos perceptualmente deficientes de las relativamente intensas reflexiones de sonido en estos elementos. Lo anterior se puede lograr con elementos difusores debajo de la cúpula de tal manera que acorten la distancia de los reflejos para reducir el tiempo entre éste y el sonido directo;⁸ además ayudaría a evitar focalizaciones propias de la cúpula dispersando la onda sonora en diferentes direcciones. En el área de la pista, se debería agregar absorción acústica en el muro perimetral, colocando paneles que reduzcan las focalizaciones de sonido. Así mismo, tanto en la cúpula como en el muro perimetral de la pista se debería agregar absorción además de difusión del sonido, como se mencionó anteriormente; para ello se podrían emplear materiales absorbentes, como por ejemplo lana mineral o fibra de vidrio, sellados y distribuidos de manera uniforme. La cantidad de estos materiales se debe hacer conforme a cálculos realizados de tiempo de reverberación y a los coeficientes de absorción de los materiales absorbentes.

⁸ Ángel Eduardo Arellano Pérez, *op. cit.*

Referencias

ADELMAN-LARSEN, NIELS WERNER

2014 *Rock and Pop Venues*, Berlin, Heidelberg, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45236-9>.

ARCHDAILY MÉXICO

2014 (enero) "Clásicos de Arquitectura: Palacio de los Deportes / Félix Candela", <https://www.archdaily.mx/mx/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela>.

ARELLANO PÉREZ, ÁNGEL EDUARDO

2024 "Diagnóstico acústico del Palacio de los Deportes de la Ciudad de México", tesis de maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, https://tesiumam.dgb.unam.mx/F/NNB5S91JT77BHQELCDNRTJKL8JKA-XA59UFX68CGYV8Q6V69MCC-01914?func=full-set-set&set_number=040981&set_entry=000001&format=999.

AUTIO, HANNA, NIKOLAOS-GEORGIOS VARDAXIS Y DELPHINE BARD HAGBERG

2023 (marzo) "An Iterative Ray Tracing Algorithm to Increase Simulation Speed While Maintaining Overall Precision", *Acoustics*, vol. 5, núm. 1, pp. 320-342, <https://doi.org/10.3390/acoustics5010019>.

BARRON, MICHAEL

1971 (abril) "The Subjective Effects of First Reflections in Concert Halls—The Need for Lateral Reflections", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 15, núm. 4, pp. 475-494, [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90406-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90406-8).

2010 *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, 2ª ed., Londres, New York, Spon Press/Taylor & Francis.

CANDELA OUTERIÑO, F., A. PEYRI MACÍA Y E. CASTAÑEDA TAMBORRELL

1968 (noviembre) "Palacio de los Deportes", *Informes de la Construcción*, vol. 21, núm. 205, pp. 6-12, <https://doi.org/10.3989/ic.1968.v21.i205.3796>.

DÁVILA DELGADO, CITLALI

2014 *Estudio acústico de la sala Xochipilli de la Escuela Nacional de Música y propuesta de mejoramiento usando difusores*, tesis de maestría en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, <https://repositorio.unam.mx/>

contenidos/estudio-acustico-de-la-sala-xochipilli-de-la-es-cuela-nacional-de-musica-y-propuesta-de-mejoramien-to-usando-difusores-91347?c=LoKW67&d=true&q=*&-i=29&v=1&t=search_0&as=0.

DAVIS, DON Y JOE MARTINSON

1980 "Using basic energy time curve (etc) measurements", Los Angeles, Audio Engineering Society.

KUTTRUFF, HEINRICH

2009 *Room Acoustics*, 5ª ed., Londres y Nueva York, Spon Press/Taylor & Francis.

LOCHNER, J. P. A. Y J. F. BURGER

1964 (marzo) "The Influence of Reflections on Auditorium Acoustics", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 1, núm. 4, pp. 426-454.

LONG, MARSHALL

2006 *Architectural Acoustics*, Amsterdam, Boston, Elsevier/Academic Press.

METKEMEIJER, R.

2023 "The Acoustics of the Auditorium of the Royal Albert Hall before and after Redevelopment", *Auditorium Acoustics 2002*.

SAVIOJA, LAURI Y U. PETER SVENSSON

2015 (agosto) "Overview of Geometrical Room Acoustic Modeling Techniques", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 138, núm. 2, pp. 708-730, <https://doi.org/10.1121/1.4926438>.

VORLÄNDER, MICHAEL

2011 "Models and Algorithms for Computer Simulations in Room Acoustics", Valencia.

2010 "Performance of computer simulations for architectural acoustics", Sydney, Australia.

Ángel Eduardo Arellano Pérez

Posgrado en Arquitectura
Universidad Nacional Autónoma de México
angelearellano@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-3757-1988>

Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica con especialización en Acústica por el Instituto Politécnico Nacional (IPN 2000-2004). Cuenta con 20 años de experiencia como consultor acústico, diseño, construcción y calibración de estudios de grabación de audio para cine, salas de cine y auditorios. A la par también trabajó como director de operaciones en Instalaciones Proyectos y Equipo S.A de C.V. (IPESA). Actualmente es director fundador de Nova Acoustic Design (NAD), miembro de la Acoustical Society of América y Audio Engineering Society. Estudiante de Posgrado en Arquitectura en la Universidad Nacional Autónoma de México.

Felipe Orduña Bustamante

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología
Universidad Nacional Autónoma de México
felipe.orduna@icat.unam.mx
<http://orcid.org/0000-0001-9026-0727>

Investigador Titular B del Grupo de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (ICAT-UNAM). Tiene licenciatura en Física (UNAM, 1987), maestría y doctorado en Sonido y Vibraciones (Universidad de Southampton, Inglaterra, 1990, 1995). Trabaja en temas de instrumentación y mediciones acústicas, procesamiento de señales, acústica musical y tecnología musical. Autor de artículos, memorias y patentes incluidos en índices académicos internacionales. Tutor y profesor de los posgrados en Ingeniería y Música de la UNAM, iniciador de las áreas de Instrumentación y de Tecnología Musical. Ha sido miembro de la Acoustical Society of America, Audio Engineering Society y otras asociaciones académicas.