



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

Entidades participantes:
Facultad de Arquitectura
Instituto de Investigaciones Históricas
FES Aragón

Diagnóstico acústico del Palacio de los Deportes de la Ciudad de México

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN ARQUITECTURA

En el campo de conocimiento de Tecnologías

PRESENTA:

Ing. Angel Eduardo Arellano Pérez

TUTOR PRINCIPAL

Dr. Felipe Orduña Bustamante

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Mtro. Eduardo Saad Eljure

Facultad de Arquitectura, UNAM

Dr. Fernando Pedro Greene Castillo

Facultad de Arquitectura, UNAM

Mtro. Ernesto Ocampo Ruiz

Facultad de Arquitectura, UNAM

Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX. 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a los distinguidos miembros de mi comité tutor, encabezados por el Dr. Felipe Orduña Bustamante, mi tutor principal. Agradezco la invaluable orientación y colaboración de mis cotutores el Mtro. Ernesto Ocampo Ruiz y al Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz. También, mi reconocimiento a mis sinodales el Mtro. Eduardo Saad Eljure, y el Dr. Fernando Pedro Greene Castillo, por dedicar su valioso tiempo al revisar esta tesis y brindarme sus conocimientos y sabios consejos, los cuales han enriquecido enormemente este trabajo.

Mi gratitud se extiende de manera especial hacia el Dr. Felipe Orduña Bustamante por su destacado compromiso y esfuerzo en la dirección de este proyecto de investigación. Aprecio sinceramente todo el respaldo incondicional y la orientación brindada en cada momento en que lo necesité, así como la amistad que ha surgido a lo largo de este proceso.

Asimismo, deseo agradecer al Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz por su constante cooperación y apoyo sincero en los momentos cruciales de este trabajo. Reconozco la colaboración del Mtro. Antonio Pérez López, del Ing. Ricardo Dorantes Escamilla y de mis compañeros del ICAT, cuya amistad, interés y ayuda fueron fundamentales en el desarrollo de esta investigación, especialmente en las mediciones acústicas. Un especial reconocimiento al Maestro Antonio Bautista Kuri por sus valiosas ideas y apoyo desde el inicio.

La contribución del Maestro Ernesto Ocampo Ruiz, el Maestro Jorge Lejostro Rangel Dávalos y mis amigos y compañeros de arquitectura ha sido inestimable. Agradezco su apoyo, amistad y participación voluntarios en las pruebas de inteligibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a Gabriel Alamán y Edgar Vieyra de Grupo CIE por facilitarme todas las condiciones necesarias para llevar a cabo las mediciones acústicas en el Palacio de los Deportes de la Ciudad de México. Su amable atención y cooperación fueron imprescindibles para el éxito de este proyecto.

Dedico este trabajo con profundo cariño a mi amada esposa Gina, a mis amados padres Leobardo y Consuelo y a mi amada hermana Monse. Su constante ánimo y apoyo fueron mi motor a lo largo de toda la maestría. Con amor, a ustedes, mi fuente inagotable de inspiración y fortaleza.

Gracias a CONAHCYT por su apoyo económico durante toda la maestría

Se agradece el apoyo de la DGAPA-UNAM al proyecto PAPIIT número IT100723: “Medición de absorción, aislamiento y difusión acústica de materiales por reflectometría y transmisión en régimen transitorio”

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de sus educandos.

Resumen

El Palacio de los Deportes de la Ciudad de México se construyó como sede de juegos de basquetbol, voleibol, lucha, judo, gimnasia etc. en los Juegos Olímpicos del año de 1968. Dado su gran aforo, en la década de 1990 comenzó a utilizarse como centro de espectáculos musicales. De inmediato se hicieron notar características audibles que los asistentes y los artistas reportan comúnmente como “rebotes” de sonido. Si bien se han realizado numerosas especulaciones tratando de explicar la causa de esto, hasta ahora se contaba solamente con el reporte de impresiones subjetivas, ya que no se había realizado ningún estudio técnico o científico al respecto. El objetivo de esta investigación es estudiar algunos aspectos del comportamiento del sonido dentro del recinto para realizar un diagnóstico acústico. Mediante cálculos analíticos, simulaciones computacionales y mediciones acústicas se ha obtenido el tiempo de reverberación y se ha realizado un análisis de las reflexiones de sonido por el método de trazado de rayos. Los resultados muestran un tiempo de reverberación excesivamente largo y reflexiones tardías con un alto nivel de presión sonora que no satisfacen los criterios perceptuales de calidad acústica que se han establecido en la literatura especializada para recintos de este tipo.

Índice general

Resumen	5
Índice general	6
Introducción	11
Historia del Palacio de los Deportes	13
Arquitectura	16
Palacio de los Deportes en la actualidad	18
Recintos similares	22
MEN Arena de Manchester	22
O2 Arena de Londres	24
Marco teórico.....	29
Geometría.....	30
Ubicación del escenario y distribución del público.....	35
Materiales	36
Técnicas de sonorización	37
Tipo de música	38
Expectativas del público e impresiones subjetivas	39
Conceptos	41
Reflexión	41

Absorción.....	41
Difusión	41
Nivel de presión sonora.....	42
Intensidad acústica.....	44
Tiempo de reverberación.....	45
EDT (Early Decay Time), T30, T20	47
Claridad (C80, C50)	50
Claridad C80.....	51
Claridad C50.....	54
Definición (D50)	56
Tiempo central (T_s)	57
Intimidad ITDG.....	58
Eco.....	59
Inteligibilidad	62
<i>Cálculo a priori del tiempo de reverberación</i>	65
Ecuación de Sabine:.....	65
Ecuación de Higiní Arau:	65
Datos paramétricos del Palacio de los Deportes	66
Resultados de cálculos.....	69

Mediciones acústicas en el Palacio de los Deportes	73
Método Implementado	73
Instrumentación	74
Registro de resultados	74
Proceso de medición	75
Resultados de las mediciones	79
Análisis de la señal de impulso obtenido del barrido senoidal logarítmico	82
Curvas de decaimiento (Decay Curves)	91
EDT (Tiempo de decaimiento temprano)	92
T20 (Tiempo de reverberación)	93
Relación EDT/T20.....	95
T30 (Tiempo de reverberación)	95
C50 (Claridad de la voz)	97
C80 (Claridad Musical).....	98
D50 (Definición)	99
Ts (Tiempo Central)	100
ITDG (Intimidad)	101
Método de medición de la inteligibilidad	103
Pruebas de inteligibilidad	104
Resumen de resultados de las mediciones.....	104
Simulación del Palacio de los Deportes con el método de trazado de rayos.....	107
Resultados de las simulaciones	108
Análisis de reflejos (método de trazado de rayos)	108

EDT (tiempo de decaimiento temprano)	114
T20 (Tiempo de reverberación)	114
T30 (Tiempo de reverberación)	116
C50 (Claridad de la voz)	118
C80 (Claridad musical)	119
D50 (Definición)	120
Ts (Tiempo central)	121
ITDG (Intimidad)	122
<i>Comparación de resultados entre cálculos, mediciones y simulaciones.</i>	123
Análisis de rayos	123
Parámetros acústicos	129
<i>Comparación de parámetros acústicos con otros recintos similares</i>	137
<i>Recomendaciones de acondicionamiento acústico</i>	141
Difusores acústicos.....	141
Tiempo de reverberación optimizado.....	143
Análisis de rayos.	150
<i>Conclusiones</i>	159
<i>Anexo – Entrevista con el Arq. José Moyao</i>	163
<i>Bibliografía</i>	171
<i>Tabla de figuras</i>	181

Introducción

Actualmente el proyectar y diseñar un recinto en donde la comunicación acústica tenga un papel importante como por ejemplo una sala de conciertos, un teatro o un auditorio, implica tomar en cuenta factores que propicien una buena calidad acústica. El rol del diseño acústico en estos recintos llevará la batuta, ya que el éxito o el fracaso del proyecto depende de cómo se escuche el sonido en el recinto.

Se debe tomar en cuenta la capacidad de recibir a determinado número de personas y procurar una buena experiencia sonora para todas. Los eventos pueden ser musicales, deportivos, discursos políticos o religiosos. Pero también pueden ser teatros para ópera, orquestas sinfónicas, conciertos con sonido amplificado hasta grandes espectáculos masivos.

La cantidad de elementos necesarios para satisfacer la demanda del recinto requieren múltiples disciplinas y expertos en cada rama. Un proyecto de este tamaño requiere arquitectos, ingenieros en sus distintas ramas, expertos en seguridad, protección civil, aire acondicionado, iluminación, sonido, etc. Además, la tecnología implementada para los espectáculos, que va desde pantallas, proyectores, amplificadores e iluminación láser, traen consigo un alto consumo de energía.

Estudiosos en la historia de la acústica arquitectónica como W. Sabine, L. Beranek y otros, han sentado las bases y marcado la pauta a seguir en el estudio y la investigación de la acústica de estos recintos. Actualmente se realizan numerosos estudios acústicos en lo que se refiere al acondicionamiento y aislamiento de sonido en recintos. Cabe mencionar que muy pocos de estos estudios acústicos se orientan a recintos con sistemas de refuerzo sonoro. Se han empleado

diferentes materiales, formas y sistemas para lograr una buena calidad. Se estudia el comportamiento del sonido en determinadas condiciones etc. Sin embargo, no siempre fue así, y de hecho no tiene más de 150 años que la acústica fue tomada en cuenta para proporcionar criterios para el diseño arquitectónico.

Durante la historia, se han diseñado recintos para teatro, música y culto religioso mejorando la acústica a base de prueba y error. Se trata de recintos para un máximo 2,000 personas aproximadamente ya que el público no podía estar muy lejos del escenario para que pudiera escuchar y ver bien. Como ejemplos exitosos de estos recintos se tienen el Grosser Musikvereinsaal en Viena, el Teatro Alla Scala de Milán, el Teatro Ópera de París, el Boston Symphony Hall y el Teatro Colón de Argentina, solo por mencionar algunos.

Paralelamente, la tecnología seguía avanzando, así como la música, con nuevos instrumentos musicales y géneros musicales. En la actualidad se emplean amplificadores y altavoces para los eventos musicales, con lo cual el sonido puede alcanzar una mayor distancia, un mayor número de personas puede asistir y ubicarse más lejos del escenario. Es así como se comenzaron a utilizar espacios que originalmente tenían otro uso, dadas sus grandes dimensiones. Comenzaron a utilizarse almacenes, bodegas, campos de fútbol, estadios, etc., en donde se pretende proporcionar una buena calidad acústica por medio del sistema de sonido. Sin embargo, estos sistemas en la mayoría de las ocasiones puede quedar limitado por la falta de un diseño acústico arquitectónico específico para el lugar. Es así como el negocio del espectáculo crea lugares multipropósito, que si bien pueden utilizarse para eventos deportivos y exposiciones, también pueden emplearse para conciertos. De esta manera se asegura un constante número de eventos para obtener mayores ganancias y recuperar la gran inversión económica.

Esta situación que es comprensible, compromete bastante la calidad acústica, ya que cada tipo de evento puede tener requerimientos acústicos muy diferentes. En estos recintos resulta importante considerar tanto los elementos arquitectónicos, como los sistemas de sonorización. Ambos se deben diseñar y operar en conjunto para brindar al espectador una buena calidad. El sonido, así como la luz, el calor, la estética y la funcionalidad debe considerarse no sólo en este tipo de eventos sino en cualquier otro ámbito de la Arquitectura.

“Las cualidades de un espacio afectan cómo percibimos el sonido y las cualidades de un sonido afectan cómo percibimos un espacio. El sonido y el espacio, están indisolublemente vinculados a nuestra experiencia vital” Arq. Beatrice Goller (Goller, 2014, p. 253)

Historia del Palacio de los Deportes

El Palacio de los Deportes es uno de los monumentos arquitectónicos icónicos de la Ciudad de México, su construcción ocurrió en una época de acontecimientos internacionales muy importantes, como la carrera por el espacio exterior entre Estados Unidos y la Unión Soviética, la llegada del hombre a la Luna y la primera transmisión satelital de televisión en vivo desde la BBC de Londres con los Beatles interpretando “All you need is love”.

Mientras tanto, en México, el panorama también era muy agitado. En la Ciudad de México, se vive el apuro en diversas construcciones y eventos correspondientes a los preparativos para los XIX Juegos Olímpicos. La Universidad Nacional Autónoma de México y el Instituto Politécnico Nacional son invadidos por el ejército por órdenes del presidente en turno desencadenando la masacre estudiantil en la Plaza de las Tres Culturas de Tlatelolco. Es en medio de todos estos acontecimientos que el Palacio de los Deportes inicia su construcción el 16 de octubre de 1966.

La Secretaría de Obras Públicas del entonces Distrito Federal (hoy Ciudad de México) organizó un concurso para la construcción del Palacio de los Deportes. La propuesta se trataba de diseñar un edificio con el objetivo principal de albergar las competencias olímpicas de baloncesto. El edificio debía ser económico, rápido, ligero y resistente contra los sismos. Dicho concurso lo ganaron los arquitectos Félix Candela, Antonio Peyri Maciá y Enrique Castañeda Tamborell.

Figura 1

Arquitectos Antonio Peyri, Enrique Castañeda y Félix Candela elaborando planos del Palacio de los Deportes



Nota: Imagen obtenida por (*Historia del Atletismo los Juegos Olímpicos México 68 - Parte VI, s/f*)

Su nombre original era el de “Palacio de los Deportes Juan Escutia” aunque le siguieron otros nombres como “Palacio de los Mil Soles” o “El Domo de Cobre” llamado así durante su construcción por su característica cubierta de láminas de cobre. Se encuentra ubicado al oriente

de la Ciudad de México, dentro del conjunto deportivo de la “Magdalena Mixhuca” en Avenida Río Churubusco y Viaducto Miguel Alemán.

Figura 2

Palacio de los Deportes



Nota: imagen obtenida de: *(Con 31 partidos en el Palacio de los Deportes se realizará la fase final del baloncesto de la olimpiada comunitaria | Olimpiada Comunitaria CDMX, s/f)*

Este icónico edificio sorprendió al mundo en esa época por su arquitectura representativa muy al estilo de Félix Candela quien tuvo como precedente el Palacio de los Deportes de Roma en donde la cúpula de concreto fue diseñada por el arquitecto Piere Luigi Nervi. El Palacio de los Deportes de la Ciudad de México se terminó de construir en septiembre de 1968 y su primer evento fue una presentación de danza con el Ballet del Siglo XX de Maurice Béjart.

Arquitectura

La arquitectura pertenece al movimiento racionalista. El Palacio de los Deportes consta de una cúpula muy ligera de hierro de 50 kg por m². La componen 121 pirámides conformadas por cuatro paraboloides hiperbólicos que sobresalen 2.5 m de la cúpula. La base de las pirámides varían de 10 a 13 m. Los materiales empleados en esta cubierta son tubos de aluminio, madera contrachapada de 38 mm de espesor, la cual está protegida con impermeabilizante asfáltico. Finalmente, al exterior se encuentran las representativas tejas de lámina de cobre de 20 milésimas de pulgada de espesor que le dan el toque distintivo de color y brillo. Las tejas se encuentran protegidas de la intemperie con recubrimiento transparente de resina acrílica.

Figura 3

Construcción de la cúpula



Nota: Imagen obtenida de (*Clásicos de Arquitectura: Palacio de los Deportes / Félix Candela | ArchDaily México, s/f*)

La cúpula se sostiene por armaduras de acero en forma de arcos de 5 m de peralte que trabajan como catenarias, donde el punto más alto se encuentra a 47 m del nivel de la pista. En cada sentido se tienen 11 arcos, cada uno con inclinación diferente, que se apoyan en tornapuntas o contrafuertes de hormigón armado y en unos tirantes de tubo.

Las graderías conforman la estructura interior y su organización consta de tres niveles:

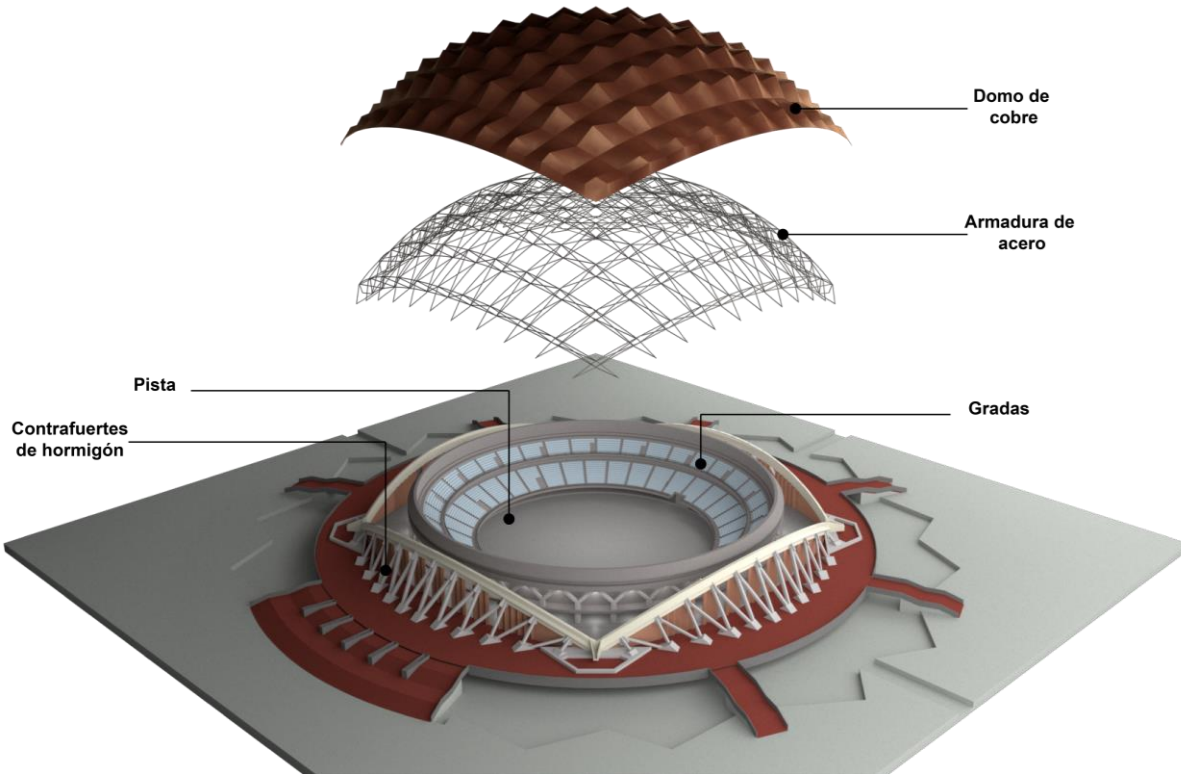
- Nivel Inferior o basamento, con alojamiento para servicios generales de deportistas, prensa y organización de los eventos.
- Nivel Principal, en donde se encuentran los vestíbulos, escaleras y accesos a las graderías baja y media.
- Nivel Superior, que alberga servicios al público, palcos y accesos a las graderías media y alta.

El exterior se compone de muros dobles de ladrillo en forma de zigzag, rellenos de hormigón con tezontle, roca volcánica, arena y cemento. Los materiales empleados en su interior son hormigón, hierro en armaduras, acero en las estructuras, ladrillo cerámico en muros y bloques de cemento.

La construcción completa y de planta circular se eleva sobre una superficie de 27.461 m² y un diámetro total de 180 m. El edificio tiene un gran aforo, contando con cupo para 22,000 personas, con 19,824 asientos.

Figura 4

Elementos componentes del Palacio de los Deportes



Nota: Imagen de elaboración propia

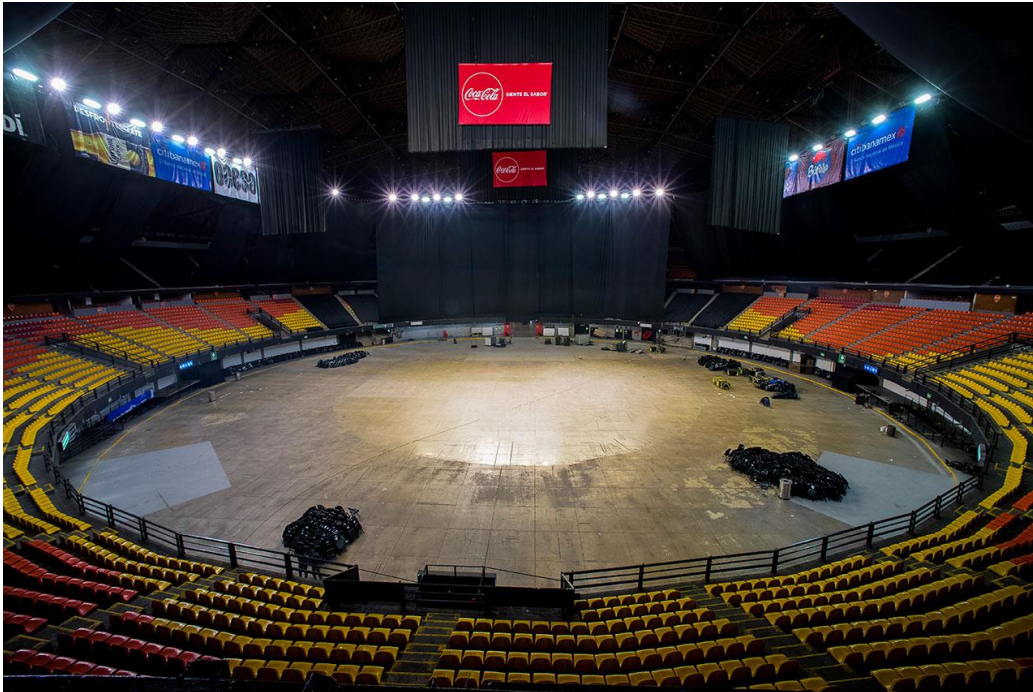
Palacio de los Deportes en la actualidad

Al término de los Juegos Olímpicos de 1968 el Palacio de los Deportes fue prácticamente abandonado, realizándose ahí sólo algunos eventos esporádicos, corridas de toros, ferias y exposiciones. A finales de la década de 1980 el gobierno del entonces Distrito Federal otorgó la concesión del Palacio de los Deportes a la empresa OCESA. De esta manera, OCESA tuvo la oportunidad de rehabilitar y operar el Palacio de los Deportes. Dicha rehabilitación corrió a cargo del Arq. José Moyao en 1988, logrando con esto la posibilidad de presentar conciertos de artistas.

En 1991 comenzó la época de los conciertos masivos con la agrupación INXS seguida de muchas otras como U2, Guns & Roses, Paul McCartney, etc (Sánchez, 2018)

Figura 5

Interior del Palacio de los Deportes



Nota: Imagen tomada de: *(Palacio de los Deportes Rentar inmueble, s/f)*

Los asistentes de inmediato reportaron que la música y las palabras no se escuchaban con claridad y que percibían ecos en el área de las gradas y la pista. Debido a esto, el público comenzó a llamarle “El Palacio de los Rebotes”. Años más tarde, el mismo arquitecto José Moyao realizó algunas adecuaciones, logrando aminorar esta percepción del sonido. Sin embargo, estas aún se presentan en la actualidad.

Desde la perspectiva de la acústica arquitectónica, se pueden considerar diferentes posibles explicaciones de estas características del sonido. Una posibilidad es que se deba a la

forma circular de la gradería, otra al domo en forma de cúpula, a los materiales que constituyen el interior del recinto o algunas otras que podrían incluir también la forma en que se sonoriza el recinto. Sin embargo, hasta ahora no existe un diagnóstico técnico completo que permita determinar de manera certera si las características percibidas en el sonido se deben a alguna de estas causas o a una combinación de ellas.

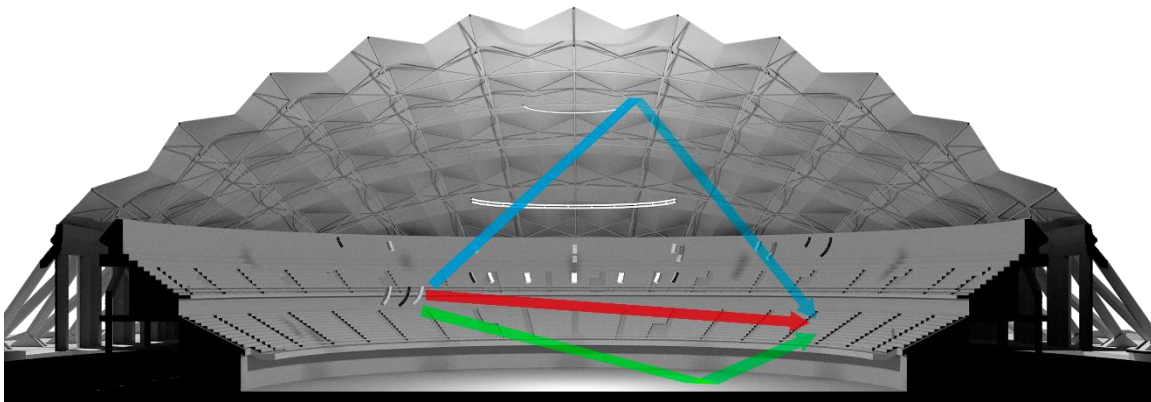
De esta manera, un primer paso es entender cómo se comporta el sonido dentro del recinto, analizar de dónde provienen las reflexiones y cuánto tiempo tardan en dejarse de escuchar. Con esta información se pueden determinar los índices y parámetros que definen la calidad acústica del recinto. Por ejemplo, si el sonido tarda mucho tiempo en dejarse de escuchar significa que el recinto es muy reverberante. Si los sonidos agudos se escuchan más que los de bajas frecuencias se dice que es un recinto brillante; en el caso contrario se dice que es un recinto opaco o cálido. Si no se entienden las palabras que canta el vocalista, en términos acústicos se determina que la inteligibilidad del habla es baja. Si no se logra diferenciar bien un instrumento musical de otro o no se logra diferenciar una nota musical de otra entonces se tiene poca claridad musical. Estos son sólo algunos de los parámetros acústicos que se pueden obtener, los cuales están definidos en las investigaciones y en los textos de Wallace Clement Sabine, Leo L. Beranek y otros. (Beranek, 2004).

A partir de estas investigaciones se sabe que el comportamiento del sonido dentro de un recinto depende de varios factores. Uno de estos es el volumen del recinto o su tamaño, ya que si es grande tendrá tiempos de reverberación largos. También depende de su geometría o forma, es decir, la disposición de los muros laterales que pueden ser paralelos como en una caja de zapatos, con alguna inclinación simulando un trapecio o circular, como en nuestro caso. El techo

también influye en gran medida, este puede tener una inclinación que distribuye el sonido hacia el público o totalmente horizontal. En el caso del Palacio de los Deportes el techo es un domo en forma de cúpula que podría crear focalizaciones de sonido en determinadas áreas. Otro factor muy importante es el de los materiales que componen las superficies; es decir materiales absorbentes o reflejantes al sonido. Estos materiales poseen un coeficiente de absorción que indica la capacidad que tienen de absorber las componentes de sonido de determinadas frecuencias. Si las superficies que componen al recinto son en su mayoría reflejantes entonces se tendrá un tiempo de reverberación largo.

Figura 6

Patrón de reflejos en cúpula



Nota: Imagen de elaboración propia

En definitiva, es determinante la necesidad de realizar un diagnóstico acústico del Palacio de los Deportes que permita estudiar y explicar el comportamiento del sonido dentro del recinto. Tal es el objetivo de esta investigación.

Recintos similares

A fin de realizar un diagnóstico es necesario determinar los parámetros acústicos y verificar si se encuentran dentro de intervalos aceptables o no, de acuerdo al tipo de evento a presentarse. Sin embargo, no existen hasta ahora normas acústicas que establezcan criterios de calidad para recintos como el Palacio de los Deportes; es decir, grandes recintos en donde se realizan conciertos masivos con grandes sistemas de sonorización y en los que generalmente se presentan bandas de rock-pop. Se pueden considerar como referencia los estudios acústicos y evaluaciones de asistentes y artistas que se han realizado en espacios similares al Palacio de los Deportes en otras partes del mundo.

Estos estudios se describen en la obra de Niels Werner “Rock and Pop Venues – Acoustic and Architectural Design”, en esta se reportan los parámetros acústicos de 55 recintos en Europa donde normalmente se presentan conciertos de rock-pop. El tamaño y forma de estos recintos son muy variados, pero dos de ellos se asemejan bastante al Palacio de los Deportes en cuanto a la capacidad de asistentes que pueden recibir, al tipo de espectáculos que se presentan y en algunas características arquitectónicas.

MEN Arena de Manchester

El MEN Arena (Manchester Evening News Arena) se terminó de construir en 1995 por las firmas de arquitectura e ingeniería DLA, Austin-Smith: Lord y Elerbe Beckett. En este recinto ha sido sede de los Juegos Olímpicos en los años 1996 y 2000, además de múltiples conciertos masivos hasta hoy en día.

Se trata de una arena techada que tiene la capacidad para albergar a 21,000 personas con un volumen de 250,000 m³ . La forma de las graderías es rectangular con las esquinas redondeadas. El piso es de concreto, los asientos están tapizados, incluso en la parte de atrás del respaldo. Los muros son en una pequeña parte de concreto y el techo está formado por trapecios de metal fino perforado. (Adelman-Larsen, 2014, p. 317)

Este espacio ha recibido muy buenos comentarios referentes a la acústica en la página de Trip Advisor. Algunos comentarios negativos son de acústica pésima, trágica, que podría ser mejor y que es muy pobre. En contraste, la gran mayoría de los comentarios son positivos con opiniones como: acústica grandiosa, buena, excelente, impresionante, superior, decente, muy buena, sin problema y fabulosa. Cabe destacar que los comentarios son de personas que asistieron a diferentes conciertos y en diferentes lugares de la arena. Según la investigación de Werner, el artista Bono del grupo U2 ha mencionado que el Men Arena de Manchester es uno de los mejores lugares para presentarse. Además, en 2002 este recinto fue nombrado “Recinto internacional del año” por la revista Pollstar (Adelman-Larsen, 2014, p. 313)

Figura 7

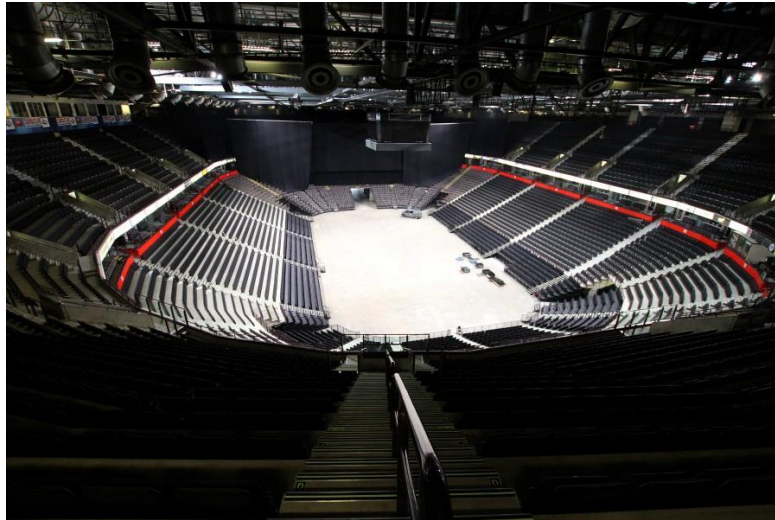
MEN Arena de Manchester



Nota: Imagen obtenida de Google Earth

Figura 8

Interior del Manchester Arena



Nota: Imagen obtenida de <https://nottinghillacademyofmusic.com/manchester-arena-cancels-shows/>

Tabla 1

Parámetros acústicos del MEN Arena Manchester

Parámetro	Frecuencias por bandas de octava [Hz]						Valor Promedio	
	63	125	250	500	1000	2000	4000	125-2000
T30 [s]	3.38	3.09	2.6	2.3	2.32	2.06	1.53	2.47
EDT [s]	2.48	2.37	2.3	2.17	2.24	2.01	1.56	2.22
C80 dB	-2.23	-3.1	1.11	0.26	-1.31	1.04	2.62	-0.40

Nota: información obtenida de (Adelman-Larsen, 2014, p. 477)

O2 Arena de Londres

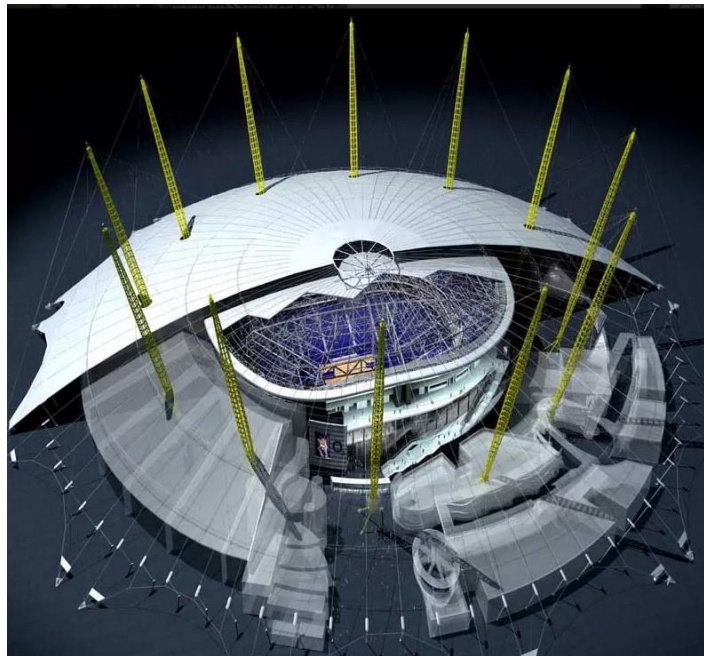
Construido en el año 2007, diseñado por el arquitecto inglés Richard Rogers y la acústica a cargo de la firma Vanguardia Consulting, en colaboración con el ingeniero de sonido de U2 Joe O’Herlihy. El O2 Arena de Londres ha recibido varios premios por diferentes organizaciones. Entre estos premios están los de la revista Pollstar como “International Arena of the Year” en los años 2009, 2010, 2012, 2013, 2016, 2017 y 2018. En este lugar se han realizado diferentes

eventos deportivos de gran importancia como los Juegos Olímpicos del año 2012 y diferentes conciertos donde se han presentado artistas internacionales.

Este recinto tiene una capacidad para 20,000 personas y tiene un volumen de 400,000 m³. De acuerdo a la página (*La Cúpula del Milenio - O2 Arena - Ficha, Fotos y Planos - WikiArquitectura, s/f*) la parte superior está conformada por un domo con forma de cúpula hecha de tela de fibra de vidrio y teflón. La cual se sostiene por medio de cables sostenidos de doce mástiles de acero que representan las horas del reloj. La cubierta tiene en la parte superior un orificio que permite el paso del aire.

Figura 9

Representación en 3D del O2 Arena London

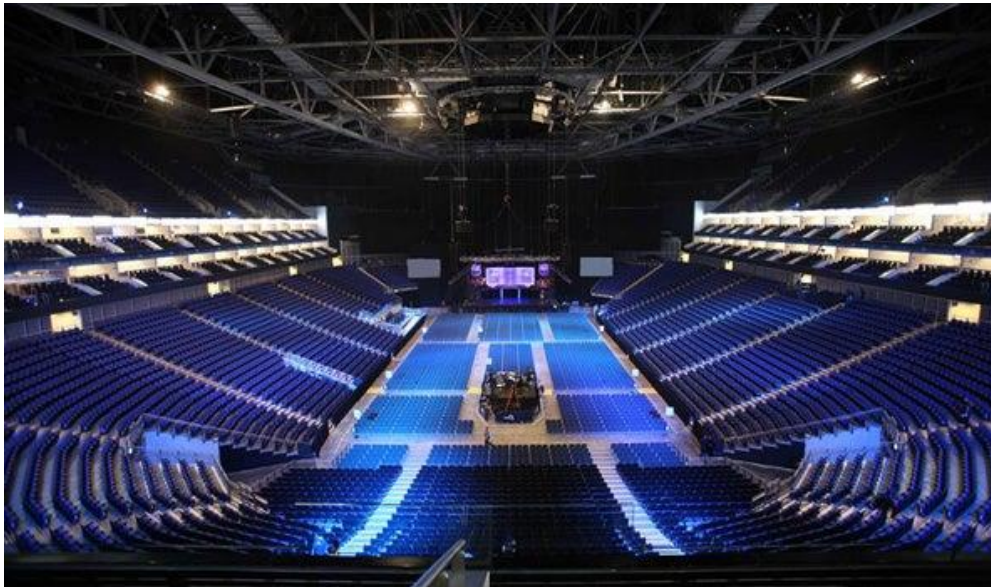


Nota: imagen obtenida de (*O2 Arena London Music Venue, Greenwich - e-architect, s/f*)

El piso es de concreto, los muros superiores posteriores tienen paneles acústicos absorbentes de 60 cm de profundidad, los muros inferiores posteriores un 80% cubiertos por paneles acústicos elevados un metro. Los balcones frontales tienen paneles de tela estirada con material absorbente detrás. Los asientos están tapizados por arriba y por debajo. (Adelman-Larsen, 2014, p. 336)

Figura 10

Interior del O2 Arena London



Nota: Imagen obtenida de *(Do You Know What This Famous Building Used To Be? | The O2, s/f)*

Se reportan opiniones en cuanto a la acústica del lugar de un gran número de asistentes en la página de Trip Advisor *(The O2 (London) - All You Need to Know BEFORE You Go, s/f)*. Estas opiniones son de asistentes a diferentes conciertos y de asientos que van desde la zona VIP hasta los lugares más económicos. Muchos de estos reportes subjetivos califican a la acústica como: espantosa, penosa, horrible, decepcionante, pobre, mala y que podría ser mejor. Sin embargo, una gran mayoría supera a estos calificativos con impresiones como: fabulosa, de lo

mejor, buena, aceptable, grandiosa, la mejor para recintos de gran escala, impresionante, correcta, trabaja bien, brillante, claridad cristalina, fantástica, con intimidad y excelente, entre otras, incluso para conciertos con orquesta.

Tabla 2

Parámetros acústicos del O2 Arena de Londres

Parámetro	Frecuencias por bandas de octava [Hz]							Valor Promedio
	63	125	250	500	1000	2000	4000	
T30 [s]	4.14	2.77	2.15	2.01	2	1.92	1.62	2.17
EDT [s]	3.51	1.85	1.61	1.76	2.06	1.89	1.63	1.83
C80 dB	-1.6	-0.28	0.55	-3.22	-4.88	-5.63	-4.95	-2.69

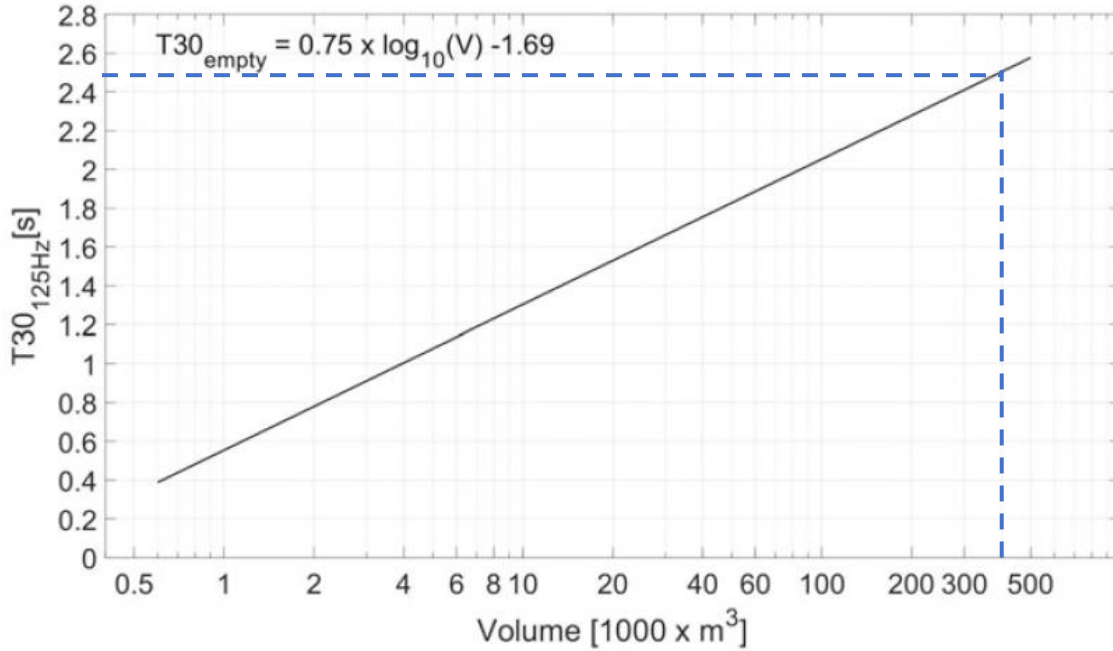
Nota: información obtenida de (Adelman-Larsen, 2014, p. 477)

De acuerdo a las características arquitectónicas y acústicas de los recintos anteriores y a los comentarios positivos que han realizado los asistentes, se puede tener una buena referencia de comparación con el Palacio de los Deportes.

Niels Werner propone una relación deseable entre el volumen o tamaño de un recinto y el tiempo de reverberación, como se muestra en la figura 11. El Palacio de los Deportes tiene un volumen de 444,194 m³, por lo que según la relación propuesta por Werner, le corresponde un tiempo de reverberación recomendado de 2.5 segundos. Algunos asistentes al Palacio de los Deportes han estimado “de oído”, sin instrumentos de medición, un tiempo de reverberación de aproximadamente 12 segundos.

Figura 11

Tiempo de reverberación recomendado en función del volumen del recinto



Nota: La línea continua muestra el valor de T_{30} recomendado en la banda de 125 Hz, para un recinto sin público (Adelman-Larsen, 2014, p. 140). La línea punteada muestra el valor que se recomienda para el Palacio de los Deportes de acuerdo a su volumen.

Marco teórico

La Ciudad de México cuenta con múltiples recintos para espectáculos musicales. Como consecuencia, se puede disfrutar de varios conciertos al año con diferentes artistas. Cada recinto tiene una acústica particular, cada uno tiene diferentes características arquitectónicas y diferentes usos. Un cine no tiene los mismos requerimientos acústicos que una sala de conciertos o un auditorio, etc. Enfocándonos en el diseño de recintos para eventos musicales, la acústica arquitectónica debería permitir, al menos en principio, obtener una buena experiencia auditiva sin exigir esfuerzos fuera de los límites del sistema de audio. Aunque la tecnología electroacústica puede ser muy eficiente, aún pueden presentarse problemas que sólo se pudieron haber evitado con un buen diseño acústico arquitectónico.

En el Palacio de los Deportes, se reporta por parte del público la percepción de un mal desempeño acústico durante eventos musicales. Recordemos, que se trata de un lugar que fue diseñado desde el comienzo sólo para eventos deportivos. Se podría pensar que entonces el recinto no cuenta con los elementos necesarios o con las características adecuadas para presentar eventos musicales. También podríamos pensar que el personal técnico del evento no colocó correctamente el sistema de altavoces o incluso que tal vez el escucha no se encontraba en el lugar adecuado.

En definitiva, alguna de estas teorías puede ser la correcta, o tal vez, varias al mismo tiempo y bien, otras más que no nos hemos planteado. Lo anterior nos lleva a hacernos una nueva pregunta: ¿cuáles son los elementos que definen el comportamiento del sonido en un recinto?. Existen varios factores que determinan el comportamiento del sonido en un recinto

cerrado. Antes de entrar en detalles y definiciones, comencemos por considerar las características del recinto en cuestión.

Geometría

El gran domo en forma de cúpula de paraboloides hiperbólicos es el elemento representativo del Palacio de los Deportes. La cúpula al ser una superficie cóncava tiene la propiedad de reflejar y concentrar la energía en áreas muy pequeñas, es decir, crear focalizaciones que amplifican el sonido y en otras zonas una atenuación del mismo. Estas estructuras que arquitectónicamente se distinguen ante las formas clásicas rectangulares son muy atractivas visualmente y a la vez son muy difíciles de tratar acústicamente. Los programas de simulación acústica de acuerdo a Lorenz y-K y Vercammen M. (Lorenz-K & Vercammen, 2006) no simulan correctamente el comportamiento de las bajas frecuencias para estas geometrías. Por lo tanto, se suele recurrir a modelos físicos a escala para poder entender el comportamiento en bajas frecuencias con la superficie cóncava. Sus investigaciones concluyeron que el efecto de focalización es mayor en una esfera que en un cilindro, además de que la focalización del cilindro es más fácil de tratar. En el mismo artículo, los autores describen cómo resolvieron el gran problema de eco que tenía el Tonhalle Düsseldorf. Este recinto se encuentra debajo de un domo en forma de cúpula. La solución fue construir una cúpula interior debajo de la primera. Esta segunda cúpula sería transparente acústicamente y opaca hacia la luz. En el espacio entre las dos cúpulas colocaron difusores piramidales con diferentes inclinaciones para aminorar estas focalizaciones. El proyecto fue llevado a cabo durante la remodelación del recinto y resultó un éxito. Como consecuencia, ahora el Tonhalle Düsseldorf puede competir con otras salas de concierto de primera clase.

El domo del Palacio de los Deportes no es una superficie lisa como en un planetario. Se trata de un domo hecho con paraboloides hiperbólicos. Estos podrían funcionar como difusores que ayuden a disminuir el efecto de la focalización. Por ejemplo, Juan Gómez y Thomas Wulfrank (Gómez et al., 2016) explican cómo una sala de conciertos en el Spuiforum Muziekcentrum fue situada en la parte más alta del edificio en donde se encuentra el techo en forma de cúpula cilíndrica. Para minimizar el efecto de las focalizaciones del sonido colocaron en la parte inferior del domo, difusores piramidales calculados con inclinaciones específicas y diferentes dimensiones, además de tener una distribución irregular. Esto lo realizaron utilizando el programa Grasshoper, ejecutando pruebas de difusión acústica. Una vez que tuvieron el diseño final, lo validaron posteriormente con el programa CATT. En el Palacio de los Deportes estos paraboloides son todos del mismo tamaño, no tienen una distribución irregular y no fueron calculados específicamente para proporcionar difusión acústica, por lo que la difusión podría no ser suficiente.

Como ya se ha mencionado, las superficies cóncavas crean zonas de focalización en donde se amplifica el sonido y crea zonas de atenuación. Para saber dónde se ubican estas zonas, Jens Holden Rindel ha realizado estudios y experimentos reportados en “Attenuation of Sound Reflections from Curved Surfaces” (Holger Rindel, 1985). En esta publicación el autor establece un método geométrico de cálculo que, aunque no es exacto, es suficientemente preciso. Su estudio considera superficies cóncavas y convexas que predicen sólo los reflejos especulares de primer orden.

$$a^* = \frac{2a_1a_2}{(a_1 + a_2)} \quad (1)$$

$$\Delta L_{\text{curv}} = -10 \log \left| 1 + \frac{a^*}{R \cos \theta} \right| \quad (2)$$

Donde:

a^* es la distancia característica

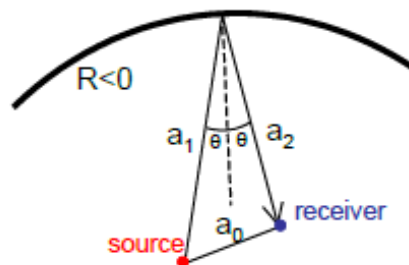
ΔL_{curv} es la intensidad del reflejo en dB

Si el resultado es negativo entonces se tiene una atenuación, en caso contrario se tiene una amplificación. Si la superficie es cóncava, el radio R de la misma tendrá un valor negativo, en caso contrario será positivo.

La figura 12, representa gráficamente los elementos de la ecuación de Rindel.

Figura 12

Representación de reflejos en la ecuación de Rindel

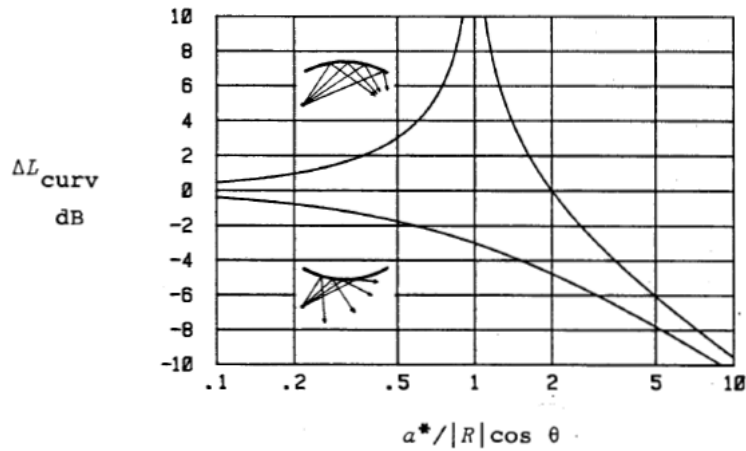


Nota: Imagen obtenida de (Wulfrank et al., 2014, p. 3)

En la siguiente figura 13 se muestra el cambio relativo en el nivel del sonido reflejado en superficies cóncavas y convexas de acuerdo a la distancia del receptor y el ángulo reflejado según la ecuación de Rindel.

Figura 13

Curvas de atenuación y amplificación



Nota: Imagen obtenida de (Holger Rindel, 1985, p. 5)

La gráfica muestra cómo la superficie cóncava crea amplificación y atenuación dependiendo del radio y las posiciones del emisor y receptor. En cambio, una superficie convexa siempre crea atenuación.

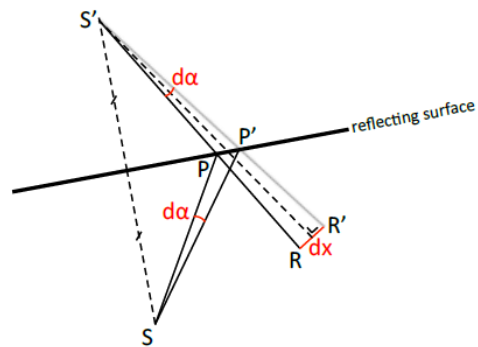
Thomas Wulfrank (Wulfrank et al., 2014) retoma estos estudios y establece un método que funciona para reflejos de orden n y para cualquier curvatura, con resultados de mayor precisión. Este método lo llamó “Differential Raytracing” el cual requiere de software NURBS para calcular el termino dx_{curv} .

$$dx_{flat} = 2|S'R|\sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

$$\Delta L_{curv} = 10\log\left(\frac{dx_{flat}}{dx_{curve}}\right) \quad (4)$$

Figura 14

Principio de "Differential Raytracing"



Nota: Imagen obtenida de (Wulfrank et al., 2014, p. 3)

En el Palacio de los Deportes, además del domo también se tienen muros circulares en la periferia de la pista y de las gradas. Dado lo anterior, se tienen dos geometrías problemáticas acústicamente, una en el plano vertical y otra en el plano horizontal.

Figura 15

Corte transversal del Palacio de los Deportes



Nota: Imagen de elaboración propia

Ubicación del escenario y distribución del público

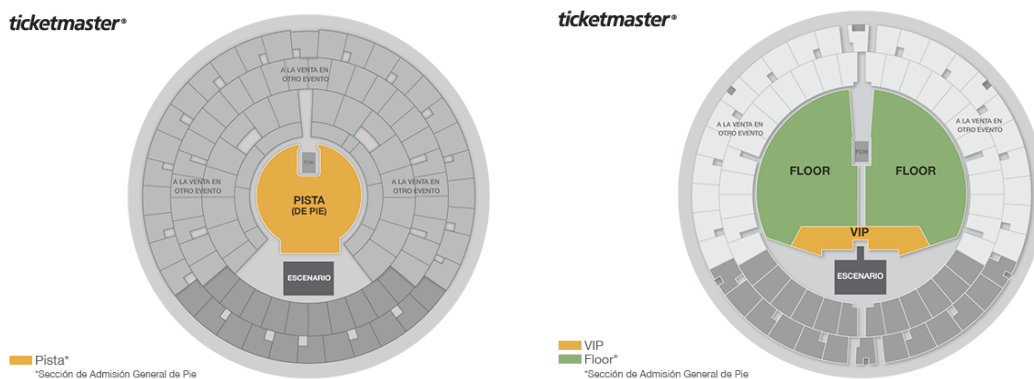
En el Palacio de los Deportes no hay una ubicación específica del escenario. De manera que muchos artistas optan por montar el escenario en el centro de la pista y otros prefieren ubicarse en las gradas (lo más común), ocupando así aproximadamente una tercera parte de las gradas; esto se explica, al parecer, por cuestiones operativas y de isóptica. Es así que los artistas tienen la libertad de elegir dos opciones de configuración para ubicar su escenario, esta podría ser una ventaja, pero, el sonido se escuchará de manera diferente dependiendo de la posición que elijan.

En consecuencia, la ubicación del escenario afecta a la posición del público. En ocasiones el público tendrá la oportunidad de ubicarse en la pista y en las gradas pero en otras solo se podrá ubicar en las gradas. Por consiguiente, el público escuchará diferente el sonido dependiendo del área donde se pueda ubicar.

Dependiendo de la ubicación del escenario y el artista se configura de manera diferente el sistema de refuerzo sonoro.

Figura 16

Ejemplos de distribución de lugares con el escenario en el centro y en un extremo de la pista



Nota: Imágenes obtenidas de : (*Palacio de los Deportes, México | Eventos y Boletos | Mapa, Viaje y Plan de Asientos, s/f*)

Materiales

Un aspecto muy importante para la acústica arquitectónica son los materiales y la cantidad de superficie ocupada por cada material. Acústicamente hablando, existen dos tipos de materiales: los absorbentes del sonido y los reflejantes.

El sonido se comporta de manera diferente si incide sobre una superficie lisa y dura como cemento o mosaico (materiales reflejantes) por mencionar algunos, o si incide sobre una superficie porosa y blanda como esponjas de poliuretano o fibras de vidrio (materiales absorbentes). Los materiales, así como el volumen del recinto son de gran importancia ya que definen un parámetro acústico fundamental llamado “tiempo de reverberación” que explicaremos a detalle más adelante.

En el Palacio de los Deportes las gradas son de concreto, se debe tomar en cuenta que en las gradas hay asientos de plástico. La pista de forma circular también es de concreto. La parte interior del domo es de madera contrachapada de 38 mm protegida con impermeabilizante asfáltico en su parte exterior que recibe finalmente las láminas de cobre. El domo está sostenido por una estructura tubular de acero y de aluminio.

Hasta aquí los materiales que se han mencionado son reflejantes. Este tipo de materiales provoca que el sonido “rebote” o se refleje como si de un espejo se tratara. Las reflexiones del sonido tendrán una intensidad similar a la del sonido directo propiciando una duración más prolongada del sonido en el recinto.

Otro elemento que se toma en cuenta como si fuera un material acústico es la presencia del público. En términos de su efecto acústico, el público o las personas en mayor o menor medida son consideradas como material absorbente. Por consiguiente, no se escuchará igual un recinto vacío que un recinto con asistencia de personas.

Técnicas de sonorización

Ahora imaginemos que ya nos encontramos en un concierto y veamos la posición del sistema de refuerzo sonoro o de los altavoces, que en casos como el del Palacio de los Deportes consiste generalmente de torres de altavoces llamadas “line arrays” o arreglos lineales. Estos sistemas tienen la particularidad de poder enviar el sonido a grandes distancias con la capacidad de controlar la cobertura angular del sonido de manera vertical y horizontal.

Lo anterior se logra estudiando las características de los modelos de altavoces, la distancia a la que serán colocados, el tipo de música o de señal que reproducirán y el área que van a “cubrir”. Podríamos tomar como analogía una lámpara que ilumina sólo un área deseada. Si queremos iluminar una mayor superficie colocamos otra lámpara o podemos cambiar el ángulo de la luz que sale de la lámpara.

El caso de los sistemas de refuerzo sonoro y de los arreglos lineales en realidad es un poco más complejo debido a los efectos de superposición constructiva o destructiva del sonido. Es decir, que pueden crear problemas de cancelaciones de sonido en ciertas zonas y por otro lado, zonas donde se genere una amplificación excesiva.

El objetivo de estos arreglos lineales es lograr una cobertura uniforme enfocando el sonido hacia el área del público. De esta manera el sonido que se encuentre fuera del área de cobertura tendrá una intensidad mucho menor y por consiguiente tendrá menos interacción el sonido directo con los muros y techo que rodean al recinto. La elección del equipo adecuado y la correcta selección de características que contemplan en las llamadas “técnicas de sonorización”.

La complejidad de formas y materiales del Palacio de los Deportes representa un gran reto para la sonorización del evento, existe la posibilidad de que no siempre se empleen las técnicas adecuadas y por lo tanto de que las desventajas acústicas del recinto no sean la única causa de un mal desempeño acústico.

Tipo de música

La mayoría de la música tipo rock / pop tiene un ritmo rápido, hay muy poco tiempo entre una nota musical y la siguiente producida por cada instrumento. Por lo tanto, si el recinto es muy grande y está cubierto en su mayoría por materiales reflejantes, entonces el sonido de cada nota musical permanecerá con una intensidad y tiempo considerables. Este es un efecto de la reverberación del recinto que provoca una menor claridad en la escucha de la música o del habla. La claridad también se verá afectada por la presencia de ecos intensos.

La música tipo rock pop, abarca un amplio espectro de frecuencias, principalmente las frecuencias bajas que provienen de la batería y del bajo eléctrico, estas generalmente son la base sonora de la pieza musical y además también propician la sensación subjetiva de envolvimiento. Por lo cual hay que prestar especial atención en el tiempo de reverberación que presenta el recinto en bajas frecuencias, el cual no debe ser demasiado corto..

Expectativas del público e impresiones subjetivas

Se cuentan con diferentes teorías sobre probables causas del mal desempeño acústico del Palacio de los Deportes. Sin embargo, es importante también tomar en cuenta la percepción general del público. Estas opiniones pueden orientar en la dirección de alguna o algunas de las posibles causas.

A continuación se presentan algunas opiniones en notas periodísticas y blogs de páginas de internet acerca de algunos eventos en el Palacio de los Deportes:

“Lo que más me entristece es que una banda tan buena como Radiohead se vaya con un mal sabor de boca de nuestra ciudad. Porque estoy seguro de que ellos se dieron cuenta en el escenario de los rebotes incontrolables, por más monitor que tengas allá arriba, eso se nota. Qué mal que éste sea nuestro foro más emblemático. Otra razón para estar triste por México.” (Rangel, 2016)

“Debo reconocer que el ambiente fue electrizante y el público se entregó al máximo, gritando y coreando prácticamente todas las canciones desde que los acordes de Go Out inundaron el coso de la colonia Granjas México pasadas las 21:30 horas... pero la arquitectura del lugar, el rebote del sonido y la ya mencionada saturación del mismo provocaron que esto fuese también un problema, pues por momentos las ondas sonoras chocaban entre sí. Para alguien que aprecie la música más allá del ambiente, la situación se tornó un poco frustrante: los acordes apenas se distinguían en ciertos temas. En una arena con estas características, el que el público grite en lugar de cantar (algo natural cuando se está en ese nivel de ebullición emotiva) suele ser terrible para escuchar una canción”. (McEnroe, 2015)

En una entrevista efectuada a René Sotelo Vega, Ingeniero de audio por Jimena Sánchez opina lo siguiente:

“Aunque el mismo lugar ya ha puesto una especie de cortinas, no es suficiente, por tanto, operar a una presión sonora moderada es prescindible para mejorar la inteligibilidad del concierto . Preferentemente, si pueden agregarse materiales porosos al lugar, ayuda bastante”. (Sánchez, 2018)

Es claro que existen más opiniones con respecto a la acústica del Palacio de los Deportes, sin embargo, estas tres que se han presentado resumen gran cantidad de ellas y las podemos agrupar en tres aspectos: la arquitectura, los materiales y la sonorización. En la página de Trip Advisor se pueden encontrar también una gran cantidad de diversos comentarios, hay quienes califican la acústica de excelente y la mayoría la califican como malísima, que no es la mejor o que no tiene una gran acústica.

Conceptos

Reflexión

Una onda sonora que incide contra una superficie puede ser reflejada dependiendo del material de esta superficie. Esta energía reflejada aún contiene un porcentaje considerable de la energía directa.

En algunos casos las reflexiones son deseables para reforzar el sonido directo. Podemos ver ejemplos de esto en los auditorios, donde los muros laterales tienen superficies inclinadas orientando los reflejos hacia la audiencia que se encuentra en las filas posteriores.

Las reflexiones del techo también se controlan mediante “plafones acústicos” con la misma función de dar una correcta orientación y uniformidad a los reflejos sonoros.

Absorción

Caso contrario a la reflexión, cuando una onda sonora incide sobre una superficie absorbente ésta se refleja pero con un porcentaje de energía mucho menor. El porcentaje faltante se disipa en el material. Se debe tener cuidado en no colocar demasiada absorción, ya que, la viveza de la sala se verá afectada, de modo que resultaría necesario emplear mayor potencia en el refuerzo sonoro.

Difusión

Cuando una onda incide sobre una superficie rugosa o irregular esta se refleja en múltiples direcciones, aún con poca pérdida de energía. Esta acción de reflejar la onda sonora en múltiples

direcciones se llama difusión. En los auditorios los difusores de sonido son una herramienta imprescindible para lograr un buen desempeño acústico.

La difusión nos permite distribuir la incidencia del sonido de una manera más uniforme hasta desde múltiples direcciones los oídos de la audiencia; en lugar de escuchar una sola reflexión de sonido proveniente de un punto localizable, se escuchará como si el sonido proviene de algún origen indeterminado, dando la impresión de un sonido envolvente y de espacialidad en la sala. La difusión nos ayuda a eliminar focalizaciones, ecos y reflejos no deseados.

Existen difusores naturales como la ornamentación en los teatros clásicos o difusores calculados para un intervalo de frecuencias específico y que dispersan la onda de una manera controlada.

Nivel de presión sonora

El sonido se caracteriza por variaciones de presión en el aire. La presión se mide y se expresa en unidades físicas de pascales (Pa) y la intensidad acústica se mide en términos de potencia por metro cuadrado watts/m^2 . La presión mínima que puede percibir un oído sano es de $20 \mu\text{Pa}$ ($20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$) o 10^{-12} W/m^2 si se expresa en términos de intensidad acústica. Estas cantidades en particular se utilizan convencionalmente como referencias para expresar en términos relativos la intensidad acústica o el nivel de presión sonora de un sonido determinado y corresponden aproximadamente con el umbral auditivo humano.

Por otro lado, el sistema auditivo humano no percibe de manera lineal con respecto a la magnitud correspondiente, es decir que si escuchamos un sonido y duplicamos su energía no

necesariamente notaremos que se escucha el doble de fuerte. Para percibir que se escucha el doble debemos elevar la energía aún más.

Con mejor precisión se considera que el sistema auditivo percibe de manera aproximadamente logarítmica. Por tales motivos se hace uso de una escala logarítmica para realizar los cálculos de nivel de presión sonora (NPS por sus siglas en español, SPL por sus siglas en inglés) o de intensidad acústica. Un beneficio práctico secundario de esto es que los cálculos aritméticos con cantidades que difieren mucho en el número de dígitos y la aplicación de factores de ganancia o de atenuación se simplifican de manera conveniente al expresar las cantidades de una escala logarítmica

De manera histórica, con el desarrollo histórico del telégrafo y el teléfono se encontró conveniente expresar la pérdida y la consecuente y necesaria amplificación de la potencia de la señal eléctrica transmitida por los cables mediante factores de 10. En honor a su fundador Alexander Graham Bell, Bell Laboratories llamó a esa unidad como “Bel”: un factor de 10 veces la potencia, ya sea eléctrica o de otros tipos de energía. Para mayor precisión, es más común expresar valores relativos de potencia con la décima parte de un bel, es decir un “decibel”, de manera logarítmica: un factor de $10^{1/10} = 1.2589$ de potencia, con lo que 10 factores de un decibel corresponden a 1 bel.

Un decibel es una unidad que se utiliza para determinar la diferencia logarítmica entre una cantidad y una referencia. Las definiciones correspondientes para la intensidad acústica y la presión sonora son las siguientes.

Intensidad acústica

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I \left[\frac{W}{m^2} \right]}{I_0 \left[\frac{W}{m^2} \right]} \right) [dB] \quad (5)$$

Donde $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

Nivel de Presión Sonora (NPS o SPL)

$$NPS = 20 \log \left(\frac{P [Pa]}{P_0 [Pa]} \right) [dB] \quad (6)$$

Donde $P_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$ o $20 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$

De esta manera, cuando tenemos una lectura de 0 dB no quiere decir que no estemos escuchando nada, sencillamente quiere decir que el nivel de sonido es igual al nivel de referencia ya que el logaritmo de 1 es igual a 0.

A manera de ejemplo, en la siguiente figura podemos observar los niveles de presión sonora en decibeles y en pascuales de diferentes fuentes de sonido.

Figura 17

Escala de niveles de sonido en dB(A)



Nota: Imagen de elaboración propia a partir de varios autores

Tiempo de reverberación

Nos referimos al tiempo que tarda la energía del sonido en disminuir 60 dB por debajo de su nivel inicial una vez que la fuente sonora ha cesado abruptamente.

El tiempo de reverberación aumenta con el volumen o tamaño del recinto y disminuye al aumentar la cantidad de superficies absorbentes.

$$TR_{60} = \frac{55.4}{c} * \frac{V}{A} \text{ [segundos]} \quad (7)$$

Donde

V = volumen del recinto [m³]

c = 344 [m/s] (velocidad del sonido en 0° C) + 0.6*T T= temperatura en °C

A = área de absorción total del recinto

$$A = S_1 * \alpha_1 + S_2 * \alpha_2 + \dots S_n * \alpha_n$$

S_n = Superficie del material [m²]

α_n = Coeficiente de absorción del material

Con esta fórmula podemos calcular el tiempo de reverberación dentro de un recinto, los materiales tienen diferente coeficiente de absorción en diferentes frecuencias. El tiempo de reverberación también es diferente para diferentes frecuencias.

El coeficiente de absorción es un número que indica el grado de absorción de sonido con respecto a la energía sonora incidente en la superficie de un material determinado. Esta relación entre la energía absorbida y la energía incidente tiene valores entre 0 y 1, siendo 0 el valor con menor absorción y 1 la máxima absorción por unidad de área del material. Podría considerarse un coeficiente de absorción de 1 para una ventana abierta al no reflejar nada de la energía incidente sobre ella.

El coeficiente de absorción en un material varía con respecto a la frecuencia. Algunos materiales son mejores para absorber frecuencias altas mientras que otros son mejores para absorber frecuencias medias, bajas, etc.

La ecuación (1) es adecuada para teatros, cines, auditorios medianos, etc. ya que se puede despreciar la absorción del aire.

En nuestro caso, el volumen de aire que hay dentro del Palacio de los Deportes es considerablemente grande, por lo cual debemos tomar en cuenta la absorción de sonido del aire como se muestra en la siguiente fórmula:

$$TR60 = \frac{55.4}{c} * \frac{V}{A + 4mV} \text{ [segundos]} \quad (8)$$

Donde

m = constante de absorción del aire,

La absorción del sonido del aire depende de la temperatura ambiente y de la humedad relativa.

El tiempo de reverberación es un parámetro muy importante en la acústica de recintos, de éste se desprenden otros como la claridad, la inteligibilidad, la viveza de la sala, etc.

Se han establecido valores recomendados de tiempo de reverberación para cada recinto dependiendo de su aplicación y de su volumen para un desempeño acústico aceptable.

EDT (Early Decay Time), T30, T20

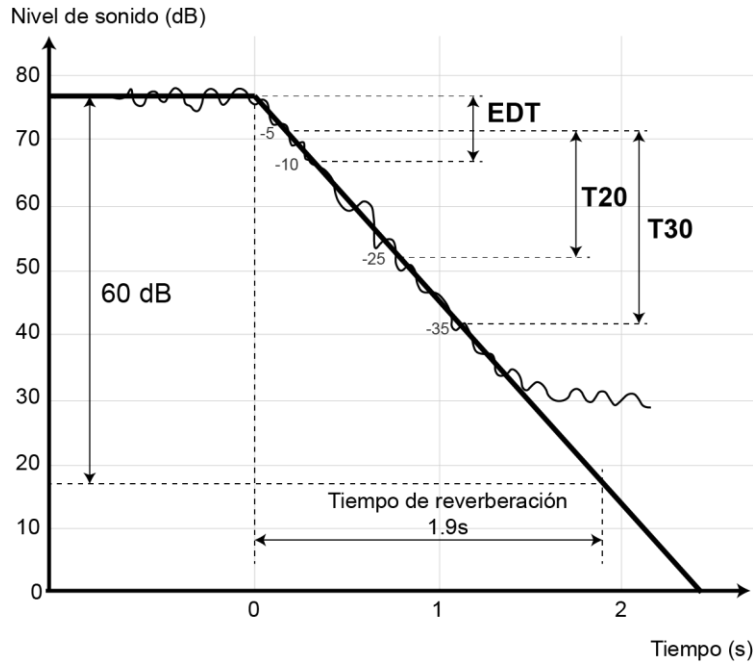
Aunque el RT60 es un parámetro muy importante, en la práctica resulta difícil medir un decaimiento de 60 dB ya que se necesita tener un ruido de fondo muy bajo para que la señal de prueba no quede enmascarada por el ruido. Además, en la música generalmente el intervalo entre un sonido y otro es muy corto como para esperar a que el sonido decaiga a ese nivel.

Por lo anterior, se ha optado por medir T20 y T30. En T20 se espera que la señal de prueba decaiga de -5 dB a -25 dB una vez que se ha interrumpido y se extrapola multiplicando el tiempo por 3 para que de esa forma T20 exprese un decaimiento convencional de -60 dB. De manera similar, T30 se mide de -5 dB a -35 dB y el tiempo se multiplica por 2 para extrapolar también a -60 dB, siendo T30 el parámetro más usado.

Es importante señalar que estos parámetros de reverberación nos proveen una descripción de las características acústicas físicas de la sala. Sin embargo, el parámetro que describe más adecuadamente cómo escuchamos la reverberación del recinto de una manera subjetiva es EDT (Early Decay Time). Este parámetro varía con la posición del escucha y es sensible a las primeras reflexiones del lugar, por lo anterior es considerado más importante que T30. EDT mide el tiempo que tarda en decaer la señal 10 dB, se mide de 0 a -10 dB y el tiempo se multiplica por 6 extrapolando así a -60 dB. Es muy importante aclarar que todos estos parámetros de reverberación: T60, T30, T20 y EDT, expresan tiempos de decaimiento de 60 dB, pero se calculan a partir de diferentes niveles de decaimiento medido. T60, T30, T20 y EDT son normalmente un poco diferentes, reflejando diferencias en la rapidez de decaimiento de NPS vs. tiempo que son características de cada recinto.

Figura 18

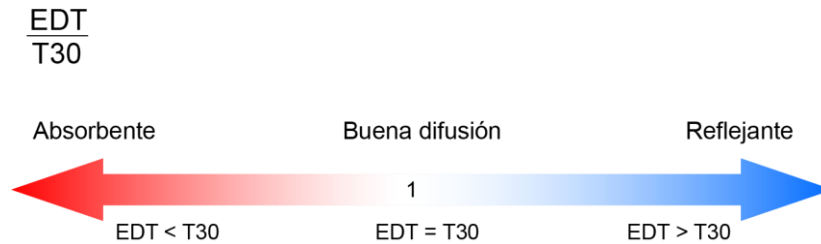
Caída del tiempo de reverberación y sus medidas



De acuerdo a (Adelman-Larsen, 2014, p. 32) se puede determinar el grado de viveza y de difusión de una sala mediante la relación entre EDT y T30. Una sala con una buena difusión de sonido se logra cuando EDT y T30 tienen valores similares, es decir, una relación cercana o igual a uno. Cuando EDT es menor a T30 el valor de esta relación es menor a uno, por lo tanto la sala dará la impresión subjetiva de ser absorbente y caso contrario EDT mayor a T30 provocará una impresión subjetiva de ser reflejante.

Figura 19

Relación entre EDT y T30



Claridad (C80, C50)

Una buena claridad permite distinguir sonidos individuales de cada instrumento así como diferencias tonales. Se mide en decibeles y su valor decrece si se incrementa el tiempo de reverberación. Así por ejemplo, en un recinto con muy baja reverberación la música se escuchará claramente. Caso contrario, el de una iglesia o recintos con mucha reverberación en donde el valor de la claridad puede llegar a tener valores negativos en decibeles. La claridad es un balance entre la energía temprana y tardía. La energía temprana se refiere al sonido directo y primeras reflexiones antes de un tiempo determinado, la energía tardía son las reflexiones que llegan después de ese lapso de tiempo. Si la energía temprana es igual a la tardía o reverberante obtendremos un valor de 0 dB. Las reflexiones tempranas son las que contribuyen a que se obtenga una mejor claridad.

Sin embargo, no siempre es deseable tener una sala musical con valores de claridad altos lo que refiere a una sala con muy poca reverberación o “muerta”. La música requiere de cierta reverberación, según (Beranek, 2004) las mejores salas de música tienen una claridad entre -1 dB y -5 dB y las mejores salas de ópera tienen valores positivos.

Dicho lo anterior, se puede resumir que la claridad varía inversamente al tiempo de reverberación. Además, depende de las reflexiones de sonido, de la geometría del lugar y del género musical debido al ritmo característico de cada género. Entre más alto sea el índice, mayor la claridad. En el caso de recintos con música amplificada la claridad además depende de la configuración del sistema de altavoces o PA. Según Rossing TD (Rossing, 2007, p. 346) para lograr una mejor claridad con este sistema se incrementa el número de altavoces repartidos en el público además de aumentar la absorción acústica por medio de materiales o resonadores acústicos e incrementar las reflexiones tempranas.

Claridad C80

Nos referimos a C80 cuando se trata de claridad musical, se mide en un intervalo de tiempo de 0 a 80 milisegundos. El sonido directo y las reflexiones que se encuentran antes de los 80 ms se denomina energía temprana. Por consiguiente, la energía que llega después de este lapso se denomina energía tardía. La claridad musical se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}{\int_{0.08}^{\infty} p^2(t) dt} dB \quad (9)$$

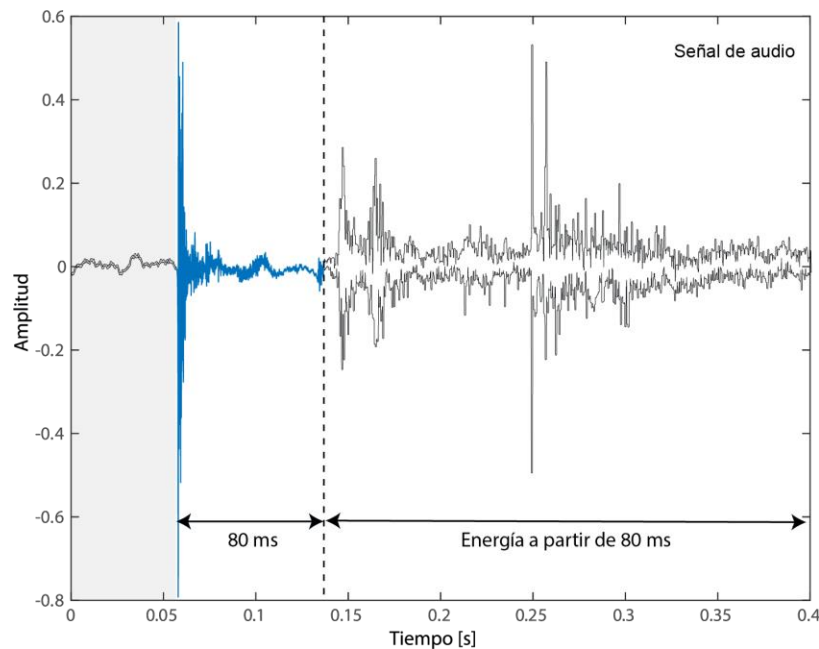
$$C_{80} = \frac{\text{Energía hasta } 80ms}{\text{Energía a partir de } 80 ms} dB$$

La claridad se mide en las bandas de frecuencia comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz. Según (Ermann, 2015, p. 67), para obtener una buena claridad se recomienda reducir la distancia entre la fuente y el escucha, angular paneles reflectores en el techo además de angular los muros laterales para maximizar el sonido directo y las primeras reflexiones. Diferentes autores recomiendan diferentes valores de claridad de acuerdo al género musical. Así por ejemplo Ning

Xiang (Xiang, 2017, p. 284) recomienda un intervalo de -3 dB a +4 dB para música romántica y para la música clásica moderna aumenta hasta +6dB. Michael Barron (Barron, 2010, p. 66) recomienda un valor de -2 dB a 2 dB para conciertos sinfónicos. Michael Ermann menciona que las mejores salas de conciertos desocupadas tienen un intervalo de claridad C_{80} de -4 dB a +1 dB.

Figura 20

Representación de C_{80}



Leo Beranek (Beranek, 2004, p. 578) denomina *average $C_{80}(3)$* al promedio de tres bandas de octava, 500 Hz, 1 kHz y 2kHz, otros autores denominan a este promedio como *claridad objetiva o representativa*. El valor que recomienda Beranek para ese promedio es de -5 dB a -1 dB para conciertos de música clásica en una sala vacía. Beranek además menciona evitar valores positivos en estas tres bandas de frecuencia, ya que estos valores implican una carencia de reverberación necesaria para la música. Meyer J (Meyer, 2009, p. 198) menciona que el valor de

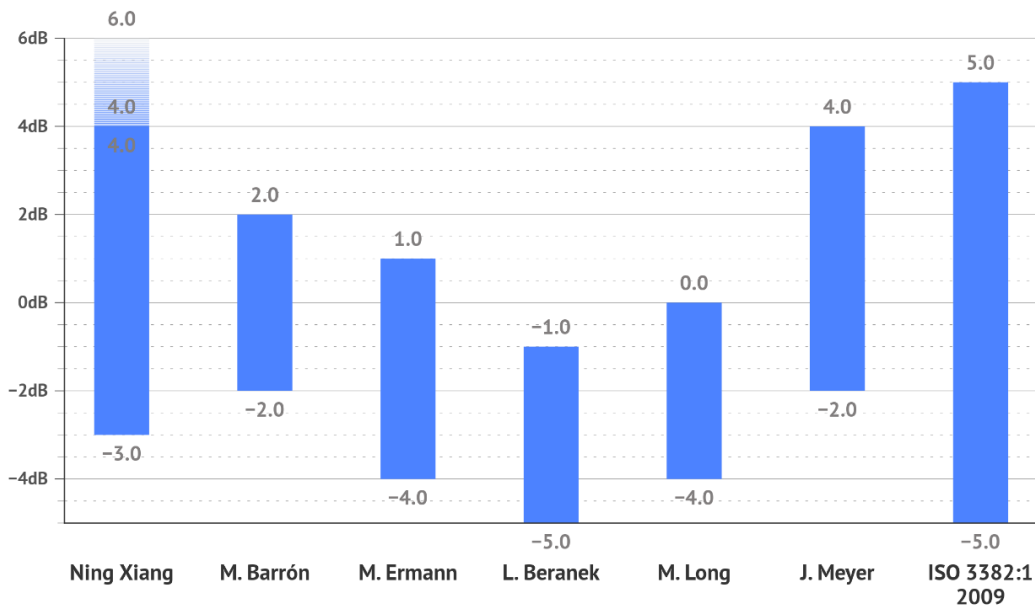
este parámetro debería estar entre -2 dB y +4 dB. El rango típico de C80 según la norma ISO 3382-1:2009 citada en el libro de Z. Maekawa (Maekawa et al., 2011, p. 98) es de -5 dB a 5 dB.

La claridad musical objetiva o representativa se calcula de la siguiente manera:

$$C_{80} = \frac{1}{3} (C_{80}^{500\text{ Hz}} + C_{80}^{1\text{ kHz}} + C_{80}^{2\text{ kHz}}) \text{ dB} \quad (10)$$

Figura 21

Valores recomendados de C80(3) según diferentes autores



Los intervalos mencionados se enfocan en salas de conciertos y en géneros musicales clásicos. El rock, jazz, funk y la música electrónica se componen generalmente de síncopas en su estructura musical, lo cual se traduce en cambios rápidos de notas. Ejemplos de música clásica con la misma estructura de síncopas las podemos escuchar en “La Traviata” de Giuseppe Verdi,

“La Novena Sinfonía” de Ludwig van Beethoven en el segundo movimiento o el “Concierto de Aranjuez” de Joaquín Rodrigo en el tercer movimiento por mencionar algunos.

Los intervalos recomendados por los autores mencionados fueron determinados midiendo la claridad en diferentes salas de conciertos. Posteriormente realizaban entrevistas al público indagando qué salas habían escuchado mejor. De esta manera llegaron a un intervalo en el que se ubican las mejores salas de conciertos, proponiendo así valores dentro de los que se debería obtener una mejor claridad acústica.

Claridad C50

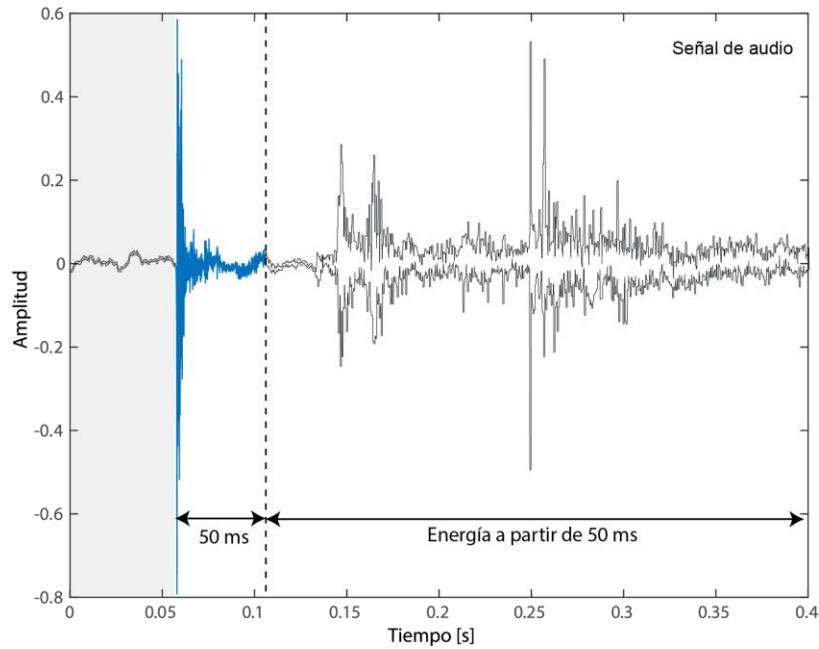
Para el caso de C50 hablamos de claridad de la voz y se mide en un intervalo de tiempo de 0 a 50 milisegundos. Por lo tanto, el sonido directo y las primeras reflexiones antes de los 50 ms se denomina energía temprana. El sonido que llega después de este lapso de tiempo se denomina energía tardía. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_{0.05}^{\infty} p^2(t) dt} dB \quad (11)$$

$$C_{50} = \frac{\text{Energía hasta 50ms}}{\text{Energía a partir de 50 ms}} dB$$

Figura 22

Representación de C50



La claridad de la voz objetiva o representativa se promedia en las bandas de frecuencia de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz de la siguiente manera de acuerdo a L.G. Marshal (Carrión Isbert, 1998, p. 184)

$$C_{50} = 0.15 * C_{50}^{500\text{ Hz}} + 0.25 * C_{50}^{1\text{ kHz}} + 0.35 * C_{50}^{2\text{ kHz}} + 0.25 * C_{50}^{4\text{ kHz}} \text{ dB} \quad (12)$$

Aunque la norma ISO 3382-1 establece un intervalo aceptable de -5 dB a 5 dB, diferentes autores recomiendan mantenerla en valores positivos preferentemente mayores a 2 dB. Este parámetro es similar a la definición D.

Definición (D50)

La definición se refiere a la relación de la energía que llega dentro de los primeros 50 ms al igual que C50, la diferencia es que en este caso la relación es con la energía total en lugar de la energía tardía. Generalmente se expresa en porcentaje. En términos subjetivos, la definición al igual que la claridad describen qué tanto se pueden distinguir los sonidos de una pieza musical o las sílabas de una palabra. De acuerdo a L. Beranek (Beranek, 2004, p. 24) la definición horizontal se refiere a notas musicales o sílabas (fonemas) sucesivamente y la definición vertical se refiere a notas o sílabas simultáneas.

$$D = 100 \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \% \quad (13)$$

$$D = \frac{\text{Energía hasta 50ms}}{\text{Energía total}}$$

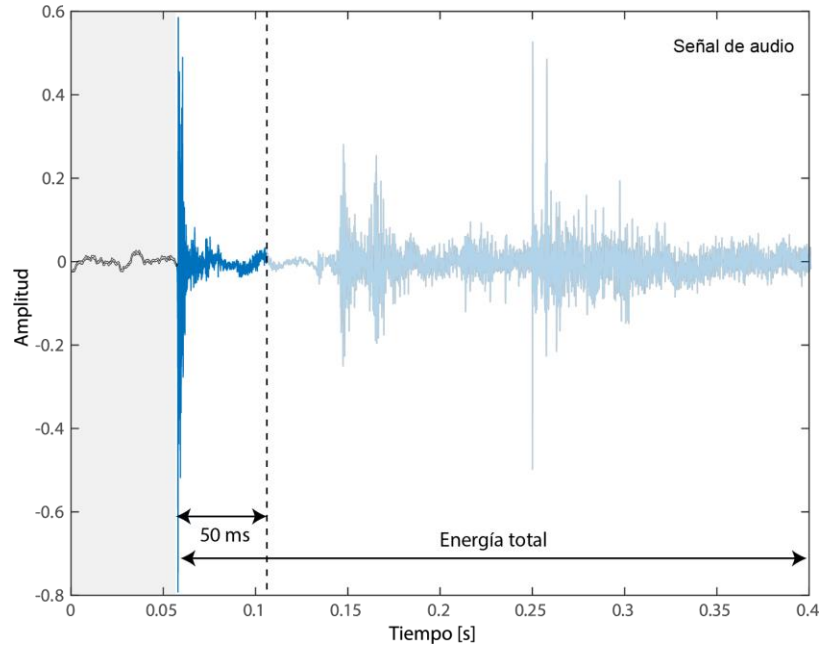
Relacionando C50 y D tenemos:

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (14)$$

Se mide en las bandas comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz. Según Ning Xiang (Xiang, 2017, p. 277) para alcanzar una inteligibilidad del 85% de las sílabas se debe tener $D \geq 50\%$ o 0.5. La norma ISO 3382-1 2009 establece que el intervalo típico de estos valores es de 0.3 a 0.7 y su valor representativo es el promedio entre las bandas de 500 Hz y 1000 Hz.

Figura 23

Representación de D50



Tiempo central (T_s)

Tiempo central o Schwerpunktzeit se refiere al punto de equilibrio o centro de gravedad en el eje del tiempo de la curva de decaimiento energético de la respuesta a impulso al cuadrado. La energía desde $t=0$ hasta T_s es igual a la energía que se encuentra después de dicho punto. Este parámetro expresa la sensación subjetiva de espacialidad y claridad o nitidez. Se recomienda que el valor de este parámetro sea bajo ya que esto implica una mayor claridad. Por el contrario, si el valor es alto denota una larga cola de reverberación que dará la impresión subjetiva de una mayor espacialidad del recinto al oyente. Lo anterior, se expresa con la siguiente ecuación:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (15)$$

Este parámetro se mide en milisegundos y en las bandas de frecuencia comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz. Según la norma ISO 3382-1:2009 el valor representativo es el promedio entre las bandas de 500 Hz y 1000 Hz con valores típicos de 60 ms y 260 ms.

De acuerdo a Ning Xiang(Xiang, 2017, p. 285), los valores deseables de T_s son:

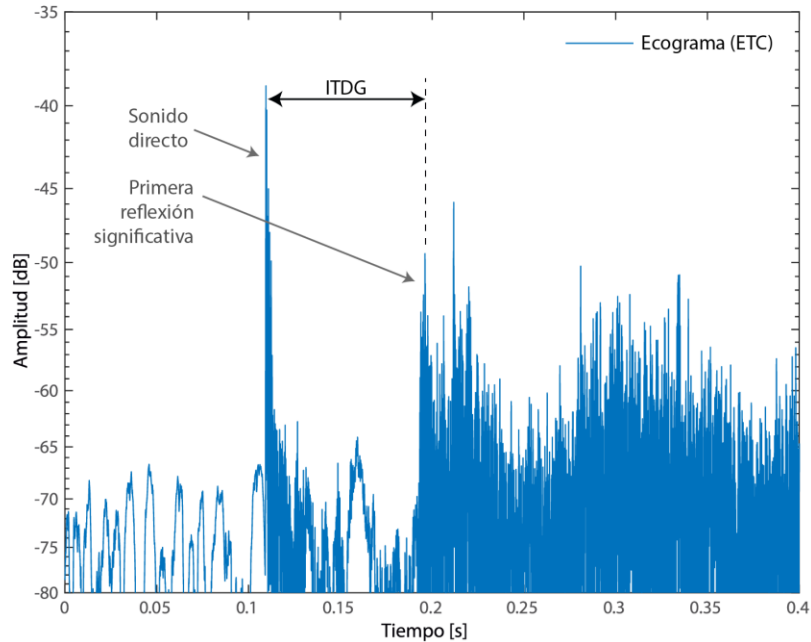
Música: $T_s \approx (70.. 150)$ ms en la octava de frecuencia de 1 kHz

Voz: $T_s \approx (60.. 80)$ ms en las octavas de frecuencia de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz

Intimidad ITDG

La intimidad ITDG corresponde a la impresión subjetiva de que la música o el sonido se reproduce en un recinto con dimensiones menores a las reales en donde los músicos se encuentran más cerca del espectador. Se le conoce como ITDG por sus siglas en inglés (Initial Time Delay Gap).

Cuando se reproduce un sonido en el escenario éste llega primero hacia nuestros oídos de manera directa, después viene una brecha (gap) de tiempo (en milisegundos) e inmediatamente llega a nosotros la primera reflexión significativa. Esta brecha de tiempo define la cercanía o intimidad con los músicos. Si es pequeña la intimidad será mayor. El valor recomendado por Beranek para esta brecha es menor o igual a 20 ms.

Figura 24*Medición de ITDG*

Si ITDG excede 45 ms se considera que el recinto no posee intimidad y la calidad acústica se verá afectada negativamente. Para lograr una mayor intimidad se recomienda colocar superficies reflejantes cerca de los escuchas para que el sonido reflejado llegue rápido, es decir, disminuir esta brecha de ITDG

Eco

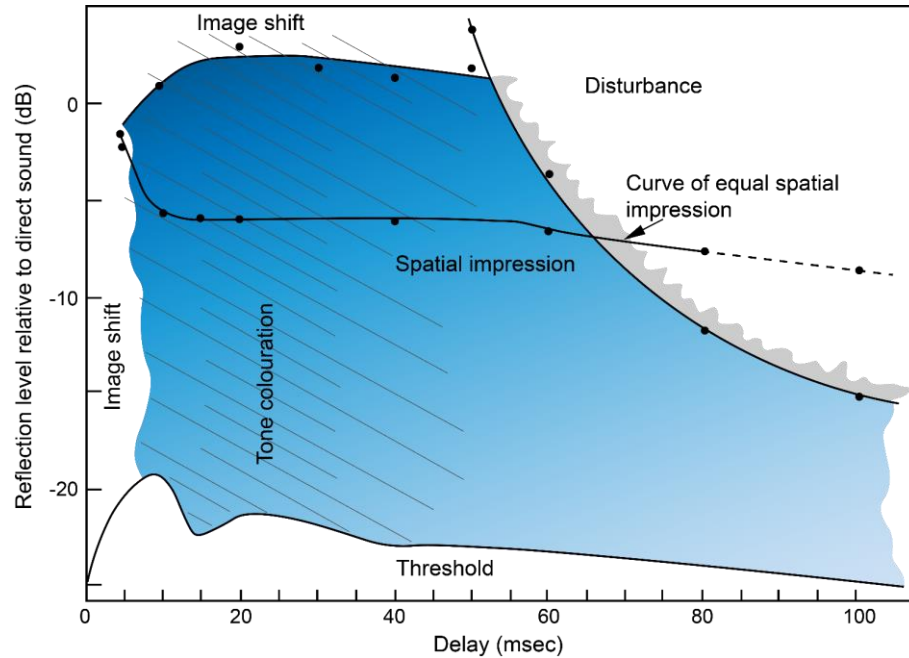
Al emitirse un sonido, este se refleja en diferentes superficies cada vez con menor intensidad a lo largo del tiempo, esto es la reverberación. Sin embargo, existen reflexiones que tienen mayor energía que la cola reverberante y en ocasiones con energía muy similar al sonido directo en diferentes momentos en el tiempo. Generalmente son resultado de las reflexiones de primer orden. Las reflexiones de primer orden son aquellas que sólo se han reflejado una sola

vez en alguna superficie, como por ejemplo el piso, techo, muro etc. y su siguiente trayectoria llega directamente al receptor, ya sea este un micrófono o un escucha. Estas reflexiones pueden ayudar a mejorar tanto la inteligibilidad como la claridad o la sensación de espacialidad. Por otro lado también pueden causar un efecto totalmente contrario, demeritando así la calidad acústica. M. Barron (Barron, 1971) se ha encargado de estudiar los efectos de estos reflejos de acuerdo a su intensidad y tiempo de llegada para determinar si se trata de un eco molesto o de un reflejo que contribuya ya sea a la espacialidad, a la inteligibilidad, etc.

Como resultado de sus investigaciones empleando música elaboró la siguiente gráfica en donde muestra los efectos subjetivos de las reflexiones y así poder caracterizarlas. En el eje horizontal se muestra el tiempo de llegada del reflejo después del sonido directo. En el eje vertical comparamos la intensidad en decibeles que tiene la reflexión con respecto al sonido directo. Los reflejos que llegan después de 10 ms ayudan a la impresión espacial subjetiva del escucha, 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 reflejos de la música que llegan después de 50 ms con altos niveles de energía se consideran ecos molestos. Estos ecos los ubicamos en el área denominada "Disturbance".

Figura 25

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

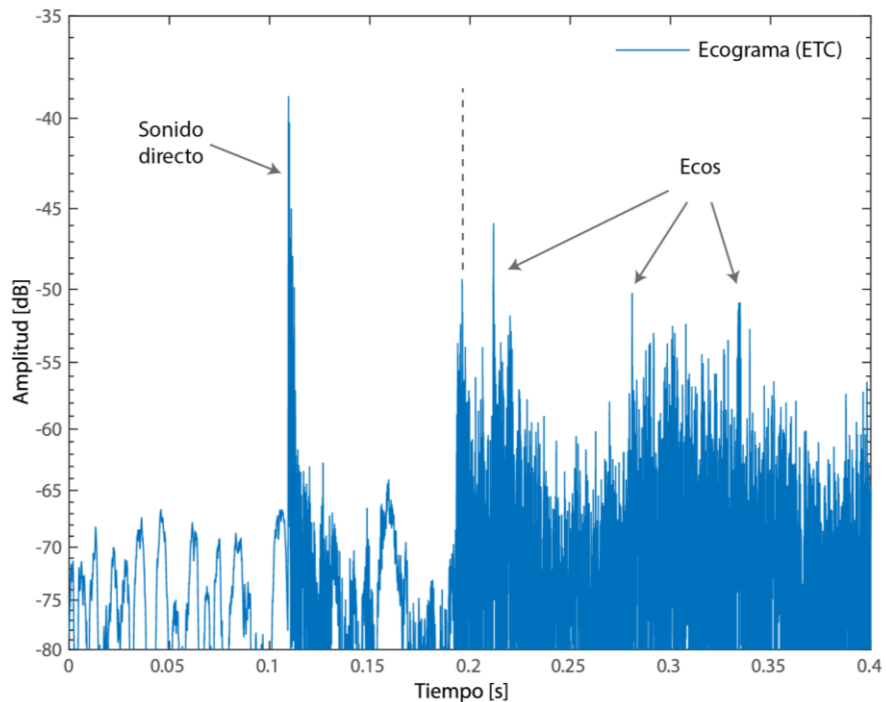


Nota: Elaboración propia basada en (Barron, 1971, p. 481)

Para visualizar la reverberación y los ecos se utiliza la gráfica de ecograma o ETC (energy time curve). Con esta gráfica podemos observar la intensidad y el tiempo de arribo de cada reflejo con respecto al sonido directo. Sin embargo, esta gráfica no muestra el origen espacial geométrico de cada reflejo. Para tal efecto es necesario apoyarse de cálculos geométricos o elaboración de maquetas a escala del recinto lo cual puede resultar en un trabajo demasiado laborioso. Hoy en día existen diversos programas informáticos que pueden realizar estos cálculos y mediante simulaciones encontrar el origen espacial de cada reflexión.

Figura 26

Ejemplo de ecograma



Como medidas para mitigar el efecto de los ecos molestos se pueden emplear materiales absorbentes o elementos reflectores acústicos suspendidos de tal manera que disminuyan el tiempo de arribo estas reflexiones, acortando ITDG y mejorando la espacialidad, intimidad y claridad acústica. Asimismo, es muy frecuente el uso de difusores acústicos que descomponen estos reflejos y los orientan en diferentes direcciones.

Inteligibilidad

Cuando se habla de inteligibilidad de la palabra nos referimos a la facilidad de entender el mensaje hablado. Cuando se puede identificar claramente cada vocal y cada consonante. Se mide mediante STI o RASTI "Rapid Speech Transmission Index". Valores de RASTI mayores a 0.75 se consideran excelentes y valores por debajo de 0.45 se consideran pobres.

En un recinto, la inteligibilidad se puede ver afectada por diversos factores, entre ellos tenemos: problemas con la fuente emisora, ruido de fondo, ruido mecánico, exceso de reverberación. De acuerdo a Niel Werner (Adelman-Larsen, 2014), cuando se usa amplificación electroacústica en cuartos grandes, el alto tiempo de reverberación en bajas frecuencias afecta la inteligibilidad. En cuartos pequeños queda afectada por los modos de resonancia acústica del cuarto en bajas frecuencias. Un sistema de altavoces puede contribuir a la inteligibilidad si estos no presentan distorsión o un volumen alto que lastima los oídos.

Cálculo a priori del tiempo de reverberación

Los cálculos para la estimación a priori del tiempo de reverberación se realizaron mediante las ecuaciones de Sabine y de Higini Arau-Puchades. La diferencia entre ambas ecuaciones radica en que la de Arau considera si la ubicación de los materiales absorbentes es uniforme o simétrica y funciona para salas de cualquier forma geométrica. Por lo anterior, evaluaremos ambas ecuaciones para obtener una estimación del tiempo de reverberación del Palacio de los Deportes.

Ecuación de Sabine:

$$TR60 = \frac{55.4}{c} * \frac{V}{A + 4mV} \text{ [segundos]} \quad (8)$$

Donde

V = volumen del recinto [m³]

c = 344 [m/s] (velocidad del sonido en 0° C) + 0.6*T T= temperatura en °C

A = absorción total del recinto

$$A = S_1 * \alpha_1 + S_2 * \alpha_2 + \dots S_n * \alpha_n$$

S_n = Superficie del material [m²]

α_n = Coeficiente de absorción del material

55.4/344 = 0.161 = Constante [s/m]

m = constante de absorción del aire.

Ecuación de Higini Arau:

$$T = \left[\frac{0.16V}{-S * \ln(1 - \alpha_x) + 4mV} \right]^{\frac{S_x}{S}} * \left[\frac{0.16V}{-S * \ln(1 - \alpha_y) + 4mV} \right]^{\frac{S_y}{S}} * \left[\frac{0.16V}{-S * \ln(1 - \alpha_z) + 4mV} \right]^{\frac{S_z}{S}} \quad (16)$$

$$\alpha_x = \frac{\alpha_{x1}S_{x1} + \alpha_{x2}S_{x2}}{S_x}, \quad \alpha_y = \frac{\alpha_{y1}S_{y1} + \alpha_{y2}S_{y2}}{S_y}, \quad \alpha_z = \frac{\alpha_{z1}S_{z1} + \alpha_{z2}S_{z2}}{S_z}$$

Donde:

V = volumen del recinto [m^3]

0.161=Constante [s/m]

m = constante de absorción del aire

α_x = Coeficiente de absorción medio de techo y piso

α_y = Coeficiente de absorción medio de paredes laterales

α_z = Coeficiente de absorción medio de frontal y posterior

$S_x = S_{x1}+S_{x2}$ Superficie total de techo y piso [m^2]

$S_y = S_{y1}+S_{y2}$ Superficie total de muros laterales [m^2]

$S_z = S_{z1}+S_{z2}$ Superficie total de muros frontal y posterior [m^2]

$S = S_x+S_y+S_z$ Superficie total del recinto [m^2]

Para alimentar la ecuación tomaremos en cuenta los siguientes datos, los cuales también utilizaremos para la simulación.

Datos paramétricos del Palacio de los Deportes

Volumen	444,194.5 m^3
Temperatura	22.1 °C
Humedad Relativa	48.7%
Presión Atmosférica	776.7 hPa

Tabla 3

Constante (m) de absorción de aire, a 20°C y presión atmosférica normal en 10-3 m^{-1}

Humedad Relativa (%)	COEFICIENTES DE ABSORCIÓN POR BANDAS DE OCTAVA							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
20	0.06	0.16	0.32	0.6	1.5	4.96	17.2	50
30	0.44	0.14	0.33	0.58	1.15	3.25	11.26	38.76
40	0.035	0.12	0.32	0.6	1.07	2.58	8.39	29.94
50	0.0218	0.1	0.3	0.63	1.07	2.28	6.83	24.24
60	0.024	0.088	0.28	0.64	1.11	2.14	5.9	20.48
70	0.021	0.077	0.26	0.64	1.15	2.08	5.32	17.88

Nota: información obtenida de (Cox & D'Antonio, 2017, p. 104)

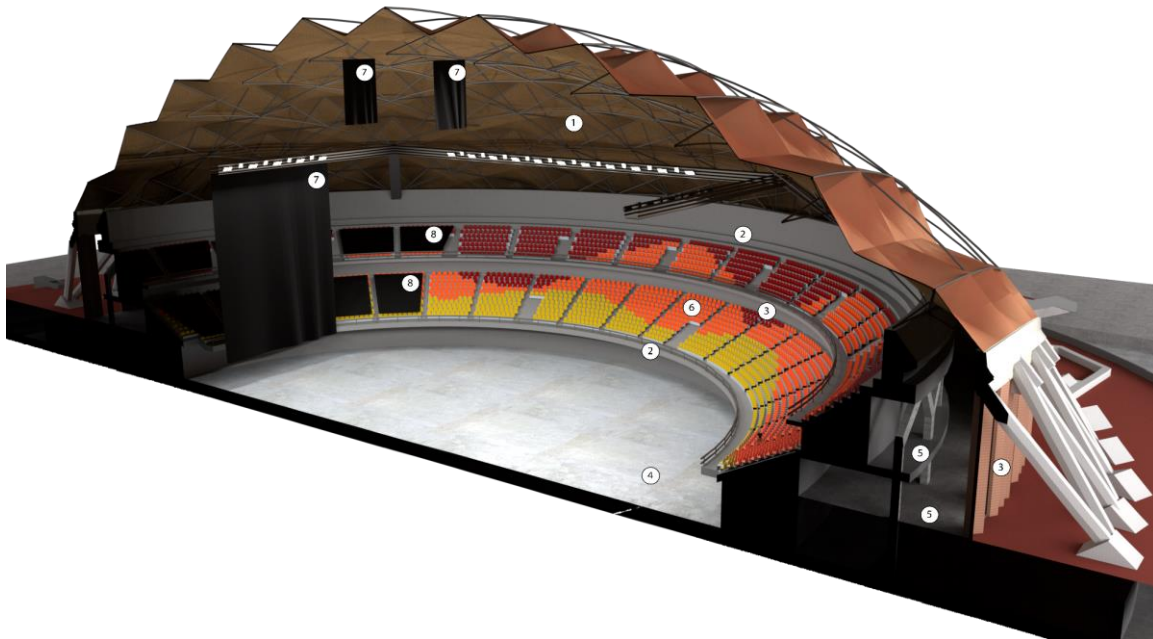
Tabla 4

Materiales y superficies que componen el interior del Palacio de los Deportes

ELEMENTO ARQUITECTÓNICO	SUPERFICIE	MATERIAL ASIGNADO
1 DOMO (cara interior)	19,575.39 m ²	Madera solida 2" de grosor
2 GRADAS	27,647.64 m ²	Concreto
3 MUROS PERIMETRALES	5,546.45 m ²	Ladrillo sin barnizar
4 PISTA	5,877.74 m ²	Piso de concreto
5 PISO PASILLOS	7,405.64 m ²	Concreto
6 ASIENTOS SIN CUBRIR	2,814.54 m ²	Asiento de metal o madera
7 LONA COLGANTEADA	1,432.66 m ²	Cortinaje de tela de 0.6 kg/m ² plegado a la mitad de su superficie
8 LONA CUBRIENDO ASIENTOS	1,144.71 m ²	Cortinaje de tela de 0.6 kg/m ² plegado a la mitad de su superficie

Figura 27

Ubicación y distribución de materiales



Nota: Imagen de elaboración propia

Tabla 5*Coefficientes de absorción de los materiales*

MATERIAL ASIGNADO	COEFICIENTES DE ABSORCIÓN POR BANDAS DE OCTAVA					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
* Madera sólida 2" de grosor	0.01	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
** Concreto	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07
** Ladrillo sin barnizar	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
** Piso de concreto	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
*** Asiento de metal o madera	0.15	0.19	0.22	0.39	0.38	0.3
*** Cortinaje de tela de 0.6 kg/m ² plegado a la mitad de su superficie	0.14	0.35	0.55	0.72	0.7	0.65

Nota: Coeficientes de absorción obtenidos de: *(Raichel, 2006, p. 250) , ** (Cox & D'Antonio, 2017, p. 475), *** (Long, 2006, p. 257)

Es importante señalar que los coeficientes de absorción de los materiales asignados fueron elegidos de los existentes dentro de la literatura investigada procurando que sea lo más parecido al material que verdaderamente se encuentra en el Palacio de los Deportes. A la madera contrachapada de 38mm (1.5") se consideró como "madera sólida de 5.08mm". Los asientos son de plástico y se consideraron como "asiento de metal o madera". El ladrillo en los muros está barnizado, pero se consideró como "ladrillo sin barnizar". La tela colgada del domo y la que cubría los asientos fue considerada como "cortinas de tela de 0.6 kg/m² plegado a la mitad de su superficie". Por tal motivo, los resultados pueden diferir de las mediciones. Para ambas ecuaciones se tomaron en cuenta los mismos parámetros y se incluyó la tela que se encontraba presente el día de las mediciones.

Resultados de cálculos

Tabla 6

Resultados del tiempo de reverberación mediante la fórmula de W. C. Sabine

Material	Superficie total del material	A = α * Superficie de material (m ²)					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Madera sólida 2" de grosor	19,575.39 m ²	195.75	978.77	978.77	783.02	783.02	783.02
Concreto	35,053.28 m ²	701.07	1051.60	1051.60	1051.60	1402.13	2453.73
Ladrillo sin barnizar	5,546.45 m ²	166.39	166.39	166.39	221.86	277.32	388.25
Piso de concreto	5,877.74 m ²	58.78	117.55	117.55	117.55	117.55	117.55
Asiento de metal o madera	2,814.00 m ²	422.10	534.66	619.08	1097.46	1069.32	844.20
Cortinaje de tela de 0.6 kg/m ² plegado a la mitad de su superficie	2,577.37 m ²	360.83	902.08	1417.55	1855.71	1804.16	1675.29
	71,444.23 m ²	1904.92	3751.06	4350.95	5127.19	5453.50	6262.04
TR60 Sabine [s]		34.13	16.59	12.99	10.11	6.82	3.86

DIAGNÓSTICO ACÚSTICO DEL PALACIO DE LOS DEPORTES

Tabla 7

Resultados del tiempo de reverberación mediante la fórmula de H. Arau

Ubicación	Material	Área	α * Superficie de material (m ²)					
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Piso	Piso de Concreto	5,877.74 m ²	58.78	117.55	117.55	117.55	117.55	117.55
Piso	Concreto	7,405.64 m ²	148.11	222.17	222.17	222.17	296.23	518.39
Techo	Cortinaje de tela de 0.6 kg/m ²	1,432.66 m ²	200.57	501.43	787.96	1,031.52	1,002.86	931.23
Techo	Madera sólida 2"	19,575.39 m ²	195.75	978.77	978.77	783.02	783.02	783.02
	Sx	34,291.43 m ²						
	S	71,444.23 m ²						
	α_x		0.02	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07
	$\ln(1-\alpha_x)$		-0.02	-0.05	-0.06	-0.06	-0.07	-0.07
	Sx/S	0.48						
	Total X		6.49	3.79	3.37	3.14	2.60	1.98

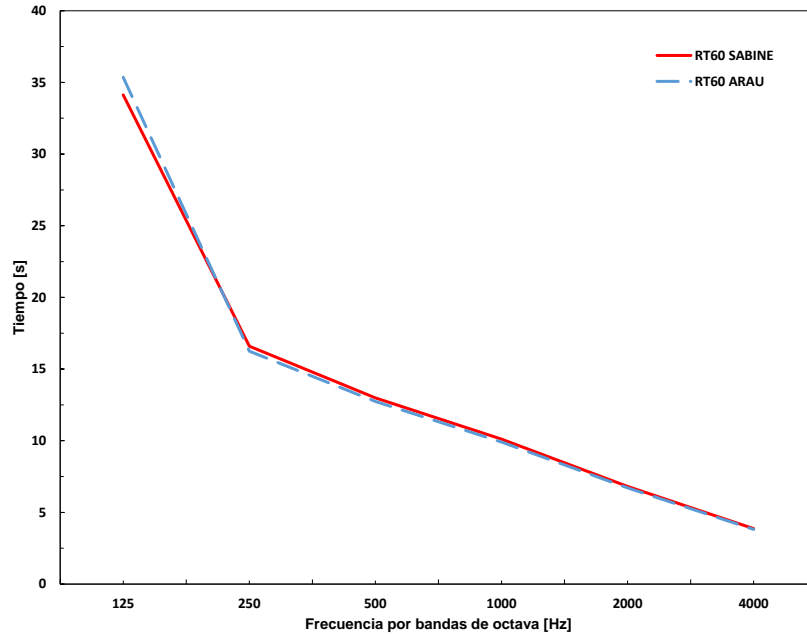
Ubicación	Material	Área	α * Superficie de material (m ²)					
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Izquierdo	Chair, metal or wood seat	938.00 m ²	140.70	178.22	206.36	365.82	356.44	281.40
Izquierdo	Concreto	6,911.91 m ²	138.24	207.36	207.36	207.36	276.48	483.83
Izquierdo	Ladrillo sin barnizar	1,386.61 m ²	41.60	41.60	41.60	55.46	69.33	97.06
Derecho	Asiento de metal o madera	938.00 m ²	140.70	178.22	206.36	365.82	356.44	281.40
Derecho	Concreto	6,911.91 m ²	138.24	207.36	207.36	207.36	276.48	483.83
Derecho	Ladrillo sin barnizar	1,386.61 m ²	41.60	41.60	41.60	55.46	69.33	97.06
	Sy	18,473.05 m ²						
	S	71,444.23 m ²						
	α_y		0.03	0.05	0.05	0.07	0.08	0.09
	$\ln(1-\alpha_y)$		-0.04	-0.05	-0.05	-0.07	-0.08	-0.10
	Sy/S	0.26						
	Total Y		2.33	2.12	2.01	1.83	1.63	1.40

Ubicación	Material	Área	α * Superficie de material (m ²)					
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Frontal	Cortinaje de tela de 0.6 kg/m ²	1,144.71 m ²	160.26	400.65	629.59	824.19	801.30	744.06
Frontal	Concreto	6,911.91 m ²	138.24	207.36	207.36	207.36	276.48	483.83
Frontal	Brick unglazed	1,386.61 m ²	41.60	41.60	41.60	55.46	69.33	97.06
Posterior	Asiento de metal o madera	938.00 m ²	140.70	178.22	206.36	365.82	356.44	281.40
Posterior	Concreto	6,911.91 m ²	138.24	207.36	207.36	207.36	276.48	483.83
Posterior	Ladrillo sin barnizar	1,386.61 m ²	41.60	41.60	41.60	55.46	69.33	97.06
	Sz	18679.76 m ²						
	S	71,444.23 m ²						
	α_z		0.04	0.06	0.07	0.09	0.10	0.12
	$\ln(1-\alpha_z)$		-0.04	-0.06	-0.07	-0.10	-0.10	-0.12
	Sz/S	0.261						
	Total Z		2.34	2.03	1.88	1.73	1.58	1.37

TR60 Arau [s] = TX*TY*TZ	35.35	16.24	12.74	9.91	6.70	3.81
---------------------------------	--------------	--------------	--------------	-------------	-------------	-------------

Figura 28

Comparación de resultados por Sabine y Arau



Los resultados de ambas ecuaciones son similares, muestran un tiempo de reverberación alto en la banda de octava de 125 Hz con una disminución pronunciada hacia la banda de octava de 250 Hz.

Los valores representativos del tiempo de reverberación (promediando los valores en las octavas de 500 Hz y 1,000 Hz) son:

$RT_{mid(500 - 1000 \text{ Hz})}$ Sabine: 11.55 s
 $RT_{mid(500 - 1000 \text{ Hz})}$ Arau: 11.33 s

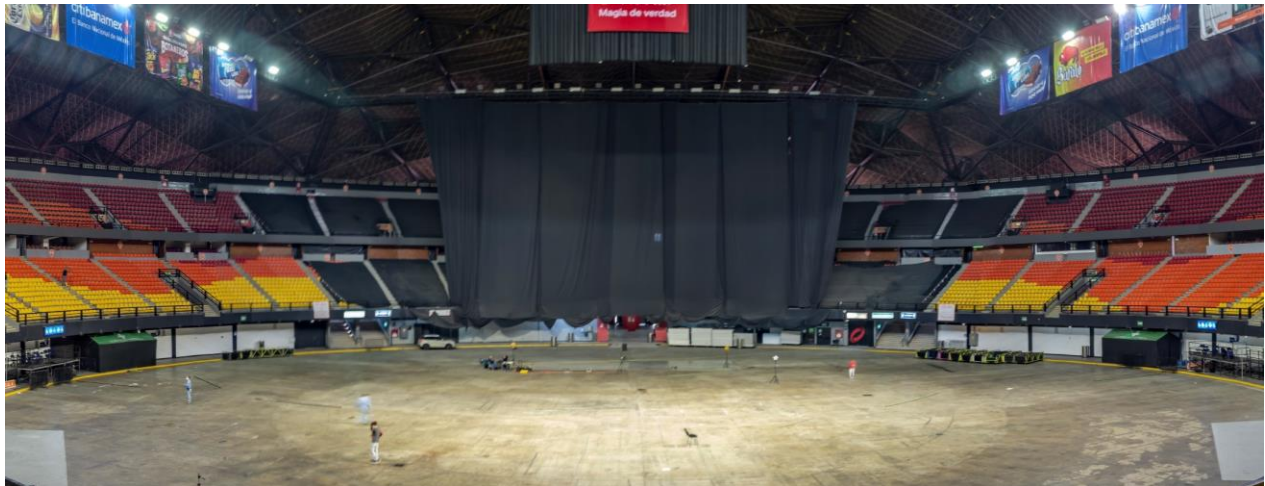
Mediciones acústicas en el Palacio de los Deportes

Método Implementado

La medición consiste en cuantificar el tiempo de reverberación y las reflexiones tempranas de sonido. Esta medición se realizó el día 30 de mayo del 2022 entre las 9:00 y las 14:00 horas en una sola sesión cuando el recinto se encontraba sin público. En el lugar se encontraba instalada una lona a manera de telón detrás del escenario que se desmontó un día anterior por motivo de un concierto y otras dos lonas más pequeñas en la parte más alta de la cúpula. Además, también se encontraban cubiertas con el mismo tipo de tela varias secciones de asientos detrás del “telón” principal como se muestra en la figura 29. Estas condiciones tienen el efecto de reducir el tiempo de reverberación del recinto además de bloquear el acceso del público a los asientos detrás del escenario.

Figura 29

Lonas en el Palacio de los Deportes



Nota: Fotografía de Leobardo Arellano Flores

Instrumentación

La medición del tiempo de reverberación se realizó tanto con señales persistentes: barrido senoidal y ruido rosa interrumpido, así como con señales impulsivas. En el primer caso se utilizaron como fuentes de sonido: una fuente omnidireccional (dodecaedro) B&K 4292-L, dos fuentes omnidireccionales diseñadas en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del ICAT, además de un altavoz activo JBL EON615. En el caso del método de impulso se utilizó el sonido de un látigo y el de una claqueta de madera. Las mediciones se llevaron a cabo con un sonómetro B&K 2270 y con un sonómetro NTi XL2, ambos con sus respectivos micrófonos de medición clase 1, como indican las normas ISO 3382 e ISO 18233. También se utilizaron cuatro micrófonos de medición omnidireccionales Beyerdynamic modelo MM1, un micrófono de cinta con patrón bidireccional Marantz Professional MPM-3500R, un micrófono cardioide de condensador de bajo ruido MXL CR89 Premium, todos conectados a una grabadora digital Zoom F6 y por otra parte, una grabadora digital Zoom H6 con dos micrófonos integrados. Se hizo un registro de la presión atmosférica, la temperatura y la humedad relativa del ambiente utilizando un anemómetro digital Krestel 4500.

Registro de resultados

La información obtenida consta de los sonidos grabados por medio de los micrófonos de medición y las grabadoras digitales. Los sonidos se obtuvieron con diferentes fuentes de excitación: claqueta de madera, látigo, ruido rosa y barrido senoidal de frecuencias, estos dos últimos emitidos por medio de altavoces omnidireccionales.

Las grabaciones tienen una duración de entre uno y cinco minutos dentro de las cuales se hicieron tomas repetidas con una separación entre ellas aproximadamente de 10 segundos. Frecuencia de muestreo de 48,000 Hz y formato de 32 bits con punto flotante.

El número de puntos o ubicaciones de los micrófonos y su distribución se eligieron de acuerdo a las normas ISO 3382 e ISO 18233.

Proceso de medición

El proceso de medición se realizó con base a la norma ISO 3382:1997. Para iniciar, se registró la presión atmosférica $P_0 = 776.7$ hPa, humedad relativa $HR = 48.7\%$ y temperatura $T = 22.1^\circ\text{C}$, considerando de nuevo que las mediciones se realizaron con el recinto sin público.

Enseguida se ubicaron las fuentes de sonido en la zona del escenario y también se colocaron los micrófonos. El número de micrófonos se determina con la siguiente tabla de la norma ISO 3382:1997. El Palacio de los Deportes tiene una capacidad de 22,000 asientos, por lo que la Tabla 1 indica medir en 16 posiciones.

Tabla 8

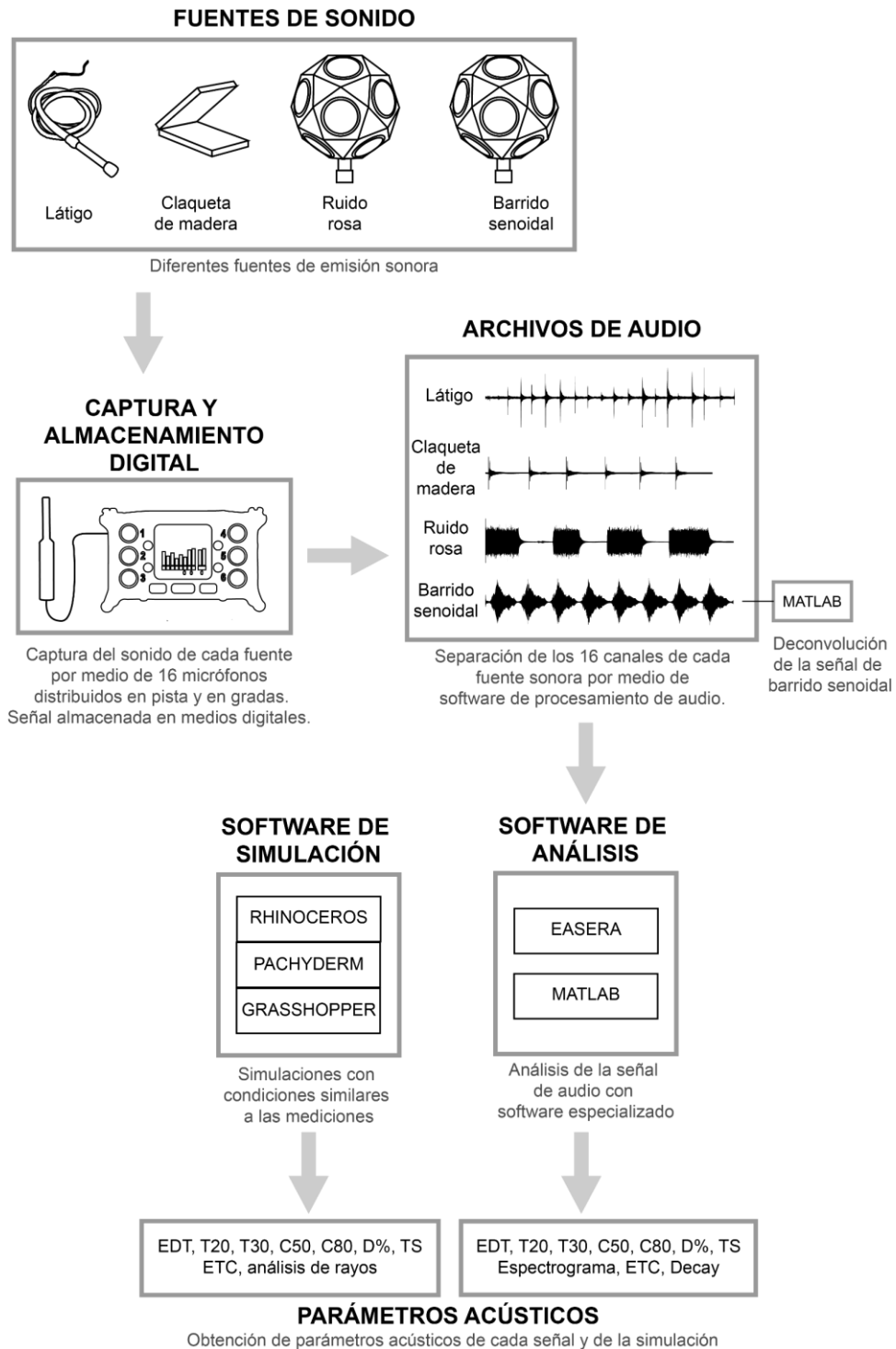
Número mínimo de posiciones de receptores en función del tamaño del auditorio.

Número de asientos	Número mínimo de posiciones de micrófono.
500	6
1000	8
2000	10
4000*	12*
8000*	14*
16000*	16*
32000*	18*

Nota: *Cantidades extrapoladas.

Figura 30

Diagrama de flujo para la realización de mediciones y obtención de parámetros acústicos



Los micrófonos se deben ubicar de acuerdo a la norma, separados a un mínimo 1 metro de cualquier superficie reflejante incluyendo el piso. Por lo que se colocaron a una altura de 1.80 m. Las grabaciones y las mediciones se llevaron a cabo en dos momentos, dado que el número de micrófonos disponibles no permitieron medir simultáneamente en las 16 posiciones indicadas. En un primer momento se midió con los micrófonos en la zona de pista y en un segundo momento con los micrófonos en la zona de gradas.

A continuación, se prepararon las grabadoras digitales y se emitió el sonido de una de las cuatro señales de prueba: claqueta, látigo, ruido rosa o señal de barrido, haciendo repeticiones con espacios de silencio de alrededor de 10 segundos. Según la Norma ISO 3382:1997, se deben hacer un mínimo de tres repeticiones; en este caso se realizaron alrededor de 10 repeticiones.

Se realizó este mismo procedimiento para cada tipo de señal de sonido (claqueta, látigo, ruido rosa o señal de barrido). Una vez utilizadas las cuatro señales, se cambió la posición de los micrófonos a la zona de gradas y se realizó todo de nuevo.

Se obtuvieron archivos de audio para cada señal con una frecuencia de muestreo de 48,000 Hz. Cada archivo de audio se analizó y los canales correspondientes a cada micrófono se separaron en archivos únicos con un editor de audio. Posteriormente se analizaron los archivos con el programa de análisis acústico EASERA, además de programación en MATLAB. Estos análisis proporcionarán los parámetros acústicos de EDT, T20, T30, C50, C80, D50 y TS, además de gráficas de decaimiento, ecogramas y espectrogramas.

Figura 31

Ubicación de fuentes y micrófonos en el recinto

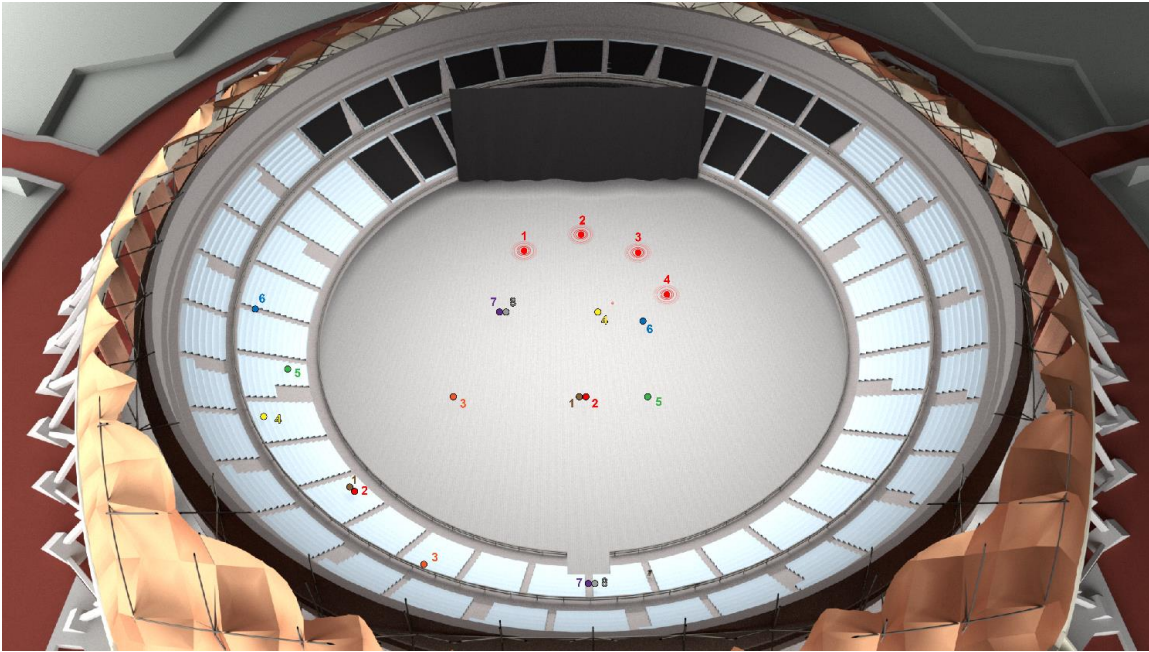


Tabla 9

Descripción de fuentes y micrófonos por canal

FUENTES

- | | |
|-------------------|-------------------------|
| 1 Dodecaedro ICAT | 3 Dodecaedro ICAT |
| 2 JBL EON615 | 4 Dodecaedro B&K 4292-L |

MICRÓFONOS EN PISTA

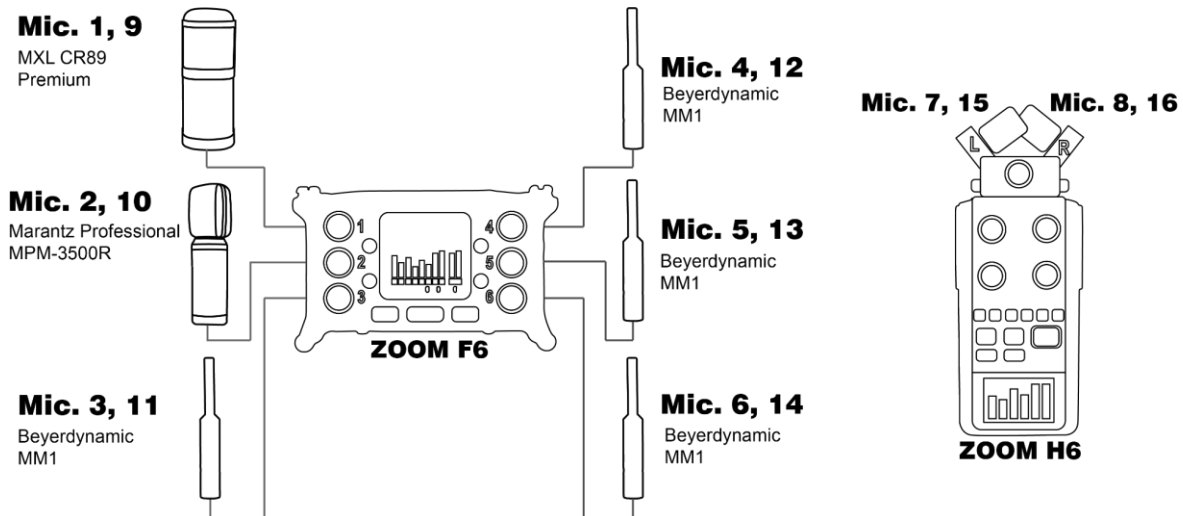
- | | |
|----------------------------------|---------------------|
| 1 MXL CR89 Premium | 5 Beyerdynamic MM1 |
| 2 Marantz Professional MPM-3500R | 6 Beyerdynamic MM1 |
| 3 Beyerdynamic MM1 | 7 Grabadora Zoom H6 |
| 4 Beyerdynamic MM1 | 8 Grabadora Zoom H6 |

MICRÓFONOS EN GRADAS

- | | |
|-----------------------------------|----------------------|
| 9 MXL CR89 Premium | 13 Beyerdynamic MM1 |
| 10 Marantz Professional MPM-3500R | 14 Beyerdynamic MM1 |
| 11 Beyerdynamic MM1 | 15 Grabadora Zoom H6 |
| 12 Beyerdynamic MM1 | 16 Grabadora Zoom H6 |

Figura 32

Conexión de micrófonos a grabadoras digitales



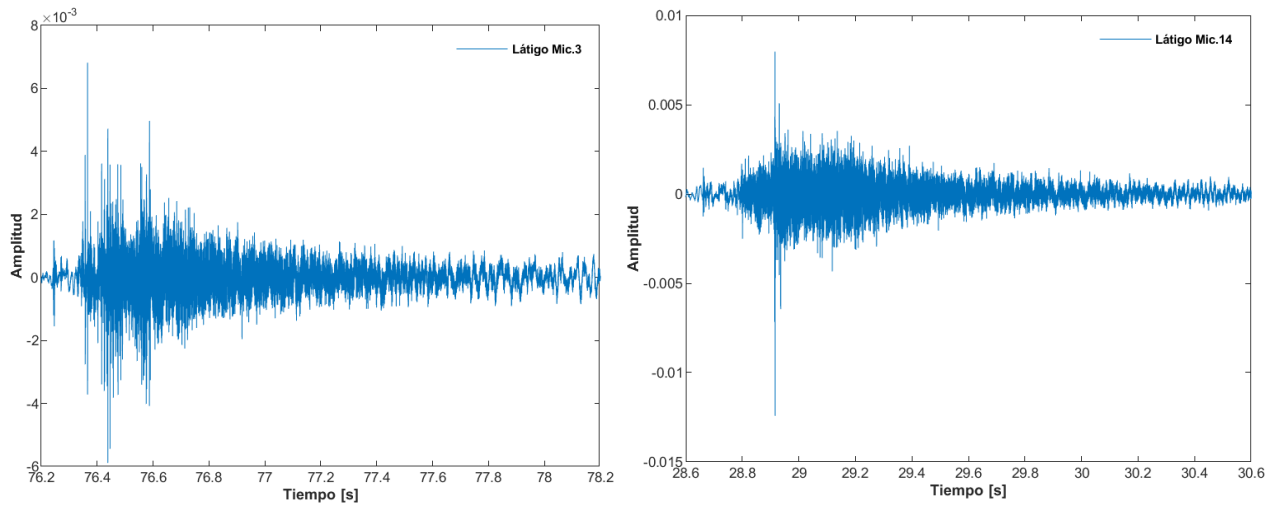
Cada uno de los archivos de audio se analizó mediante los programas EASERA 1.0.60 y MATLAB. Los audios obtenidos en los micrófonos 7 y 8 integrados a la grabadora Zoom H6 registraron ruido eléctrico que afectaron de manera importante a la calidad de la señal, por lo tanto se descartan para el análisis. En las mediciones realizadas en las gradas se puede observar que en el micrófono 3 se presentó ruido eléctrico, probablemente debido a un falso contacto en el cable, por lo tanto este canal queda descartado para los análisis de las gradas.

Resultados de las mediciones

Los tiempos de reverberación obtenidos con el látigo dan resultados confiables en las bandas de frecuencia de 1/3 de octava a partir de 800 Hz y frecuencias superiores; para frecuencias inferiores los resultados no son confiables. Lo anterior muy probablemente debido que el nivel de presión sonora no alcanzó a superar el ruido de fondo en esas frecuencias.

Figura 33

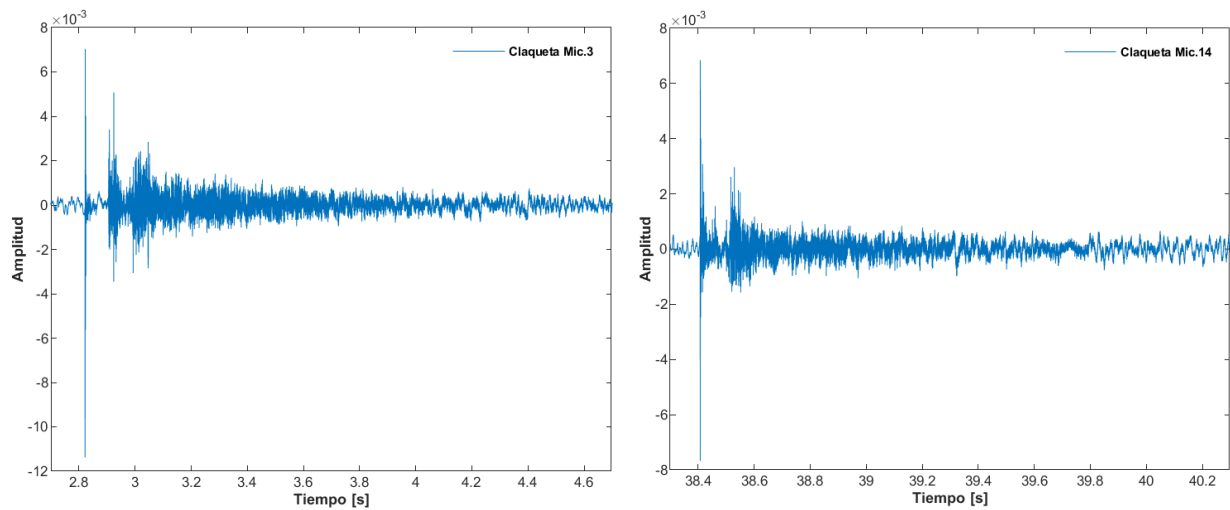
Audio de látigo registrado en micrófonos 3 (pista) y 14 (gradas)



Las señales de sonido generadas por la claqueta mostraron un mejor registro que las generadas con el látigo, presentando tiempos de reverberación confiables solamente a partir de 800 Hz.

Figura 34

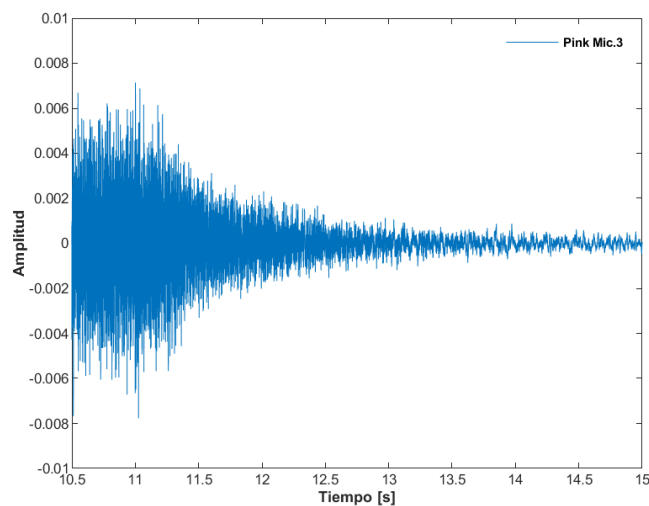
Audio de claqueta registrado en micrófonos 3 (pista) y 14 (gradas)



El método de ruido rosa interrumpido presentó un mejor registro de la señal en todo el ancho de banda en comparación con el látigo y la claqueta. En este método el nivel de presión sonora debe ser lo bastante alto para no confundirse con el ruido de fondo. En un recinto de las dimensiones del Palacio de los Deportes esto depende de que los altavoces alcancen un nivel de presión sonora suficiente. En las mediciones realizadas esta condición sólo pudo cumplirse adecuadamente para las mediciones registradas por los micrófonos ubicados en la pista.

Figura 35

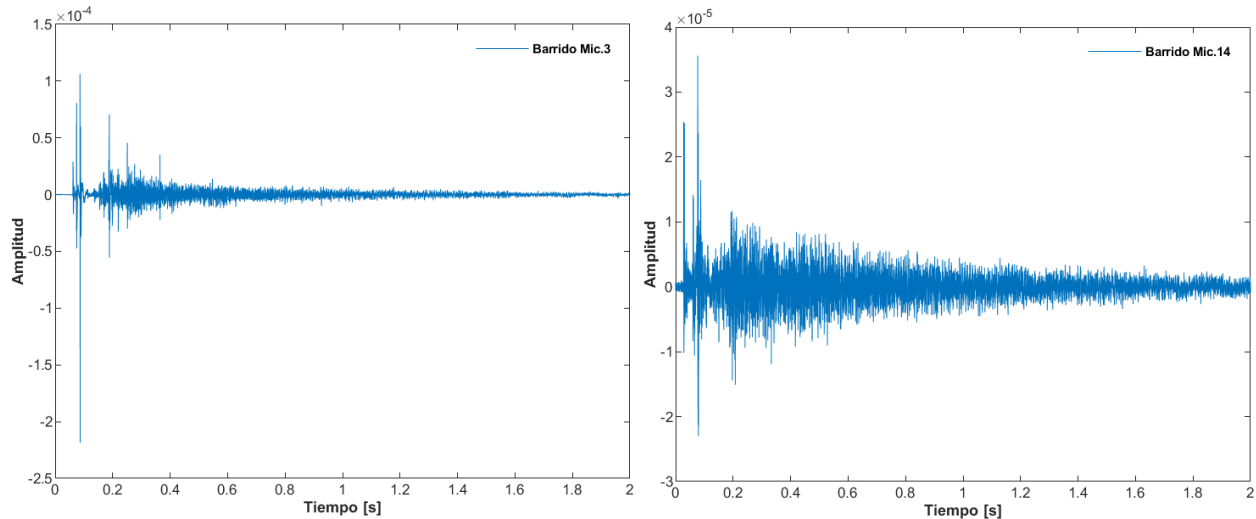
Audio de ruido rosa interrumpido registrado en micrófono 3 (pista)



La señal de barrido senoidal logarítmico presentó resultados con un decaimiento más uniforme en tiempo de reverberación y similar entre cada micrófono. A continuación se muestran las formas de onda del impulso obtenido a partir del barrido generado en el recinto.

Figura 36

Señal de impulso obtenido del barrido senoidal logarítmico en los micrófonos 3 (pista) y 14 (gradas)



Análisis de la señal de impulso obtenido del barrido senoidal logarítmico

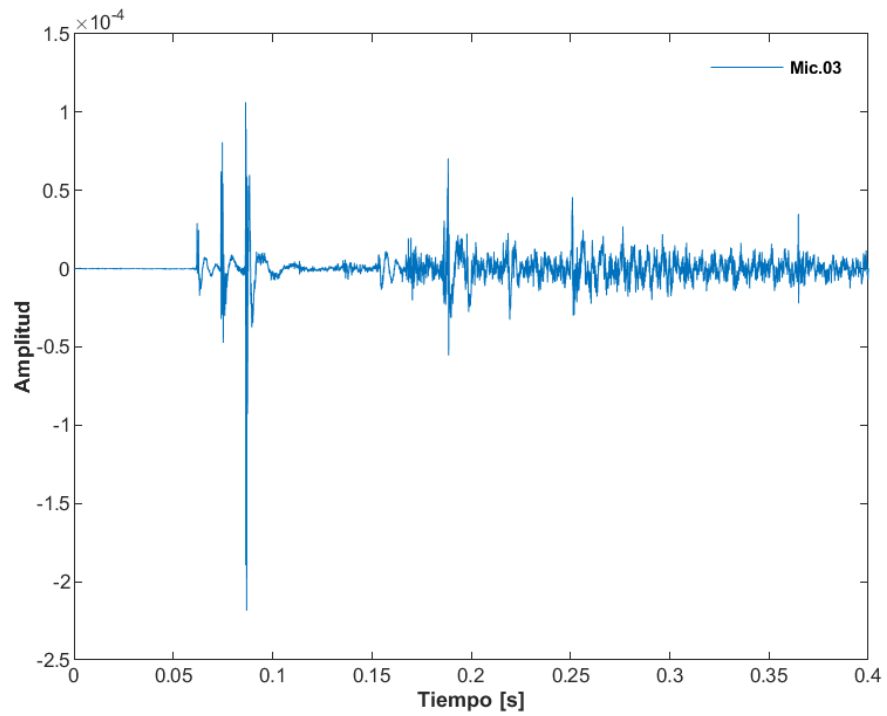
Si bien la respuesta impulso obtenida tiene una duración de más de 10 segundos, se analizan en este caso los primeros 400 milisegundos ya que en ese intervalo se encuentran las reflexiones de primer orden. Estas reflexiones son las que mayor impacto tienen en la percepción auditiva por tener mayor intensidad. El resto de la cola de reverberación contiene reflexiones de segundo orden y de órdenes superiores en adelante.

En la figura 37 se observa la respuesta impulso medida en el micrófono 3 en la pista en un tiempo de 400 ms. Los picos que se observan dentro de los primeros 100 ms corresponden al sonido directo de los altavoces. Posteriormente, después de los 180 ms comienzan a observarse las primeras reflexiones. Esta gran diferencia de tiempo de 80 ms resulta perjudicial para la inteligibilidad y la claridad. En este tipo de gráfica se dificulta observar la relación de energía entre los picos. Por tal motivo se opta por observar una gráfica ETC (Energy Time Curve).

El origen de estas reflexiones registradas por el micrófono será determinado por medio de la simulación por trazado de rayos.

Figura 37

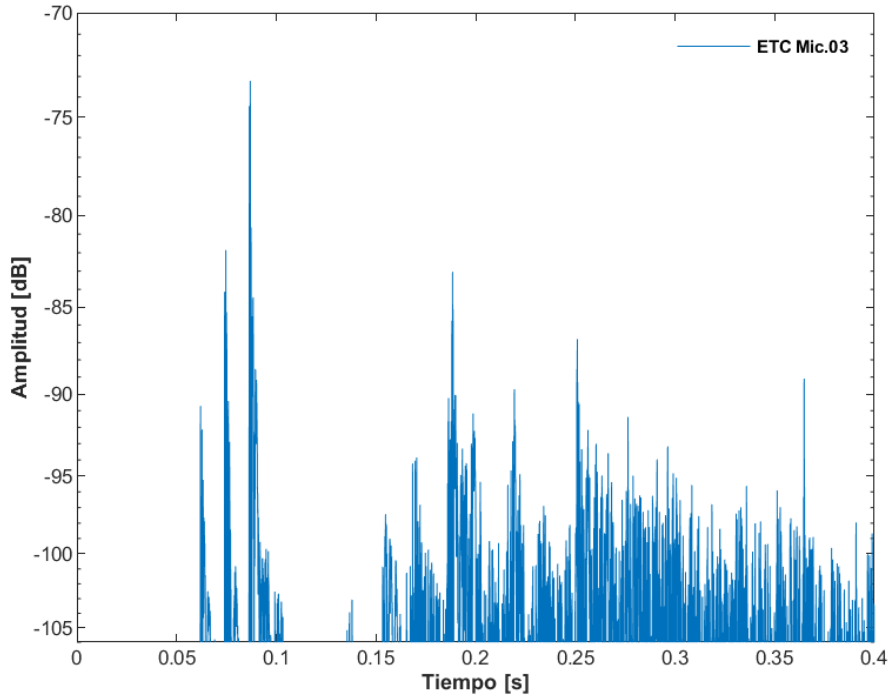
Señal de impulso del micrófono 3 en pista



La figura 38 muestra la curva ETC, esta curva toma los valores de la gráfica anterior elevados al cuadrado y expresados en decibeles.

Figura 38

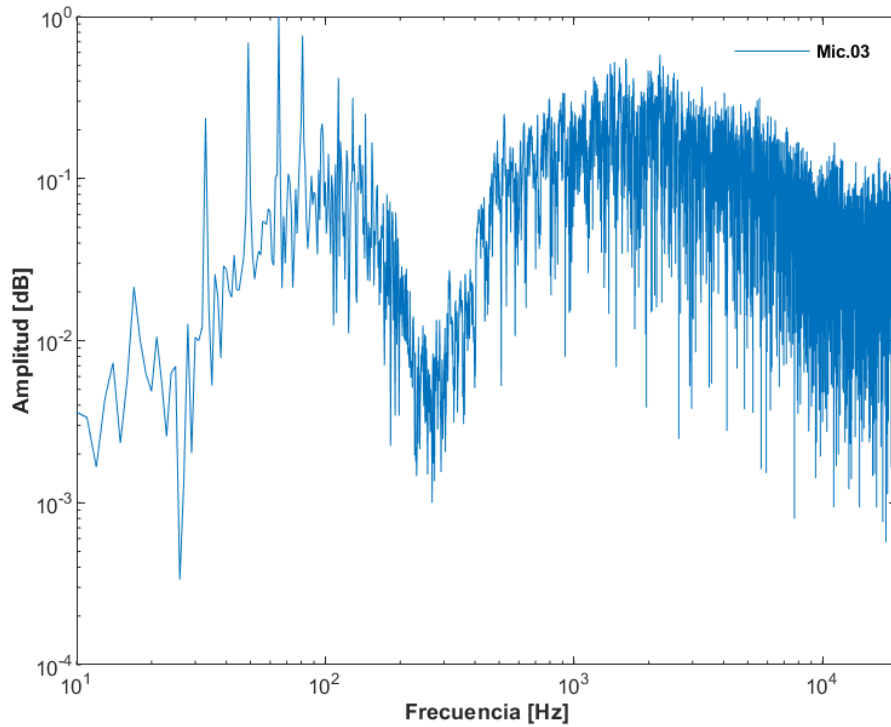
Gráfica ETC del micrófono 3 en pista



Hasta ahora se ha analizado el comportamiento de la señal en función del tiempo. Sin embargo, es necesario saber qué frecuencias son las que se han registrado así como su energía. Por tal motivo, en la figura 39 se tiene una gráfica de densidad espectral, la cual considera el tiempo completo de la grabación. Esta gráfica muestra una alta densidad de frecuencias hasta los 5 kHz.

Figura 39

Densidad espectral del micrófono 3 en pista



La curva ETC se complementa con la figura 40 que muestra la respuesta en frecuencia del recinto. Esto es, la energía que contiene cada frecuencia además de separarla por bandas de octava. Se observa que el decaimiento de la respuesta en frecuencia se hace cada vez más pronunciado conforme aumenta la frecuencia.

La figura 41 que muestra un espectrograma con las frecuencias en el eje vertical y el tiempo en el eje horizontal. La escala de colores indica la intensidad del sonido en función de la frecuencia y a lo largo del tiempo.

Figura 40

Respuesta en frecuencia del micrófono 3 en pista

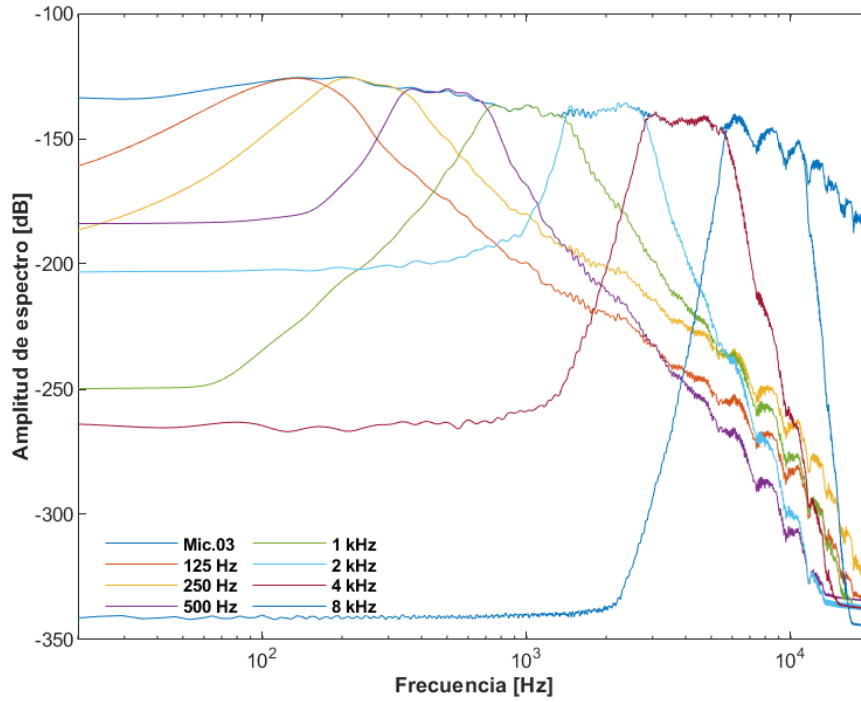
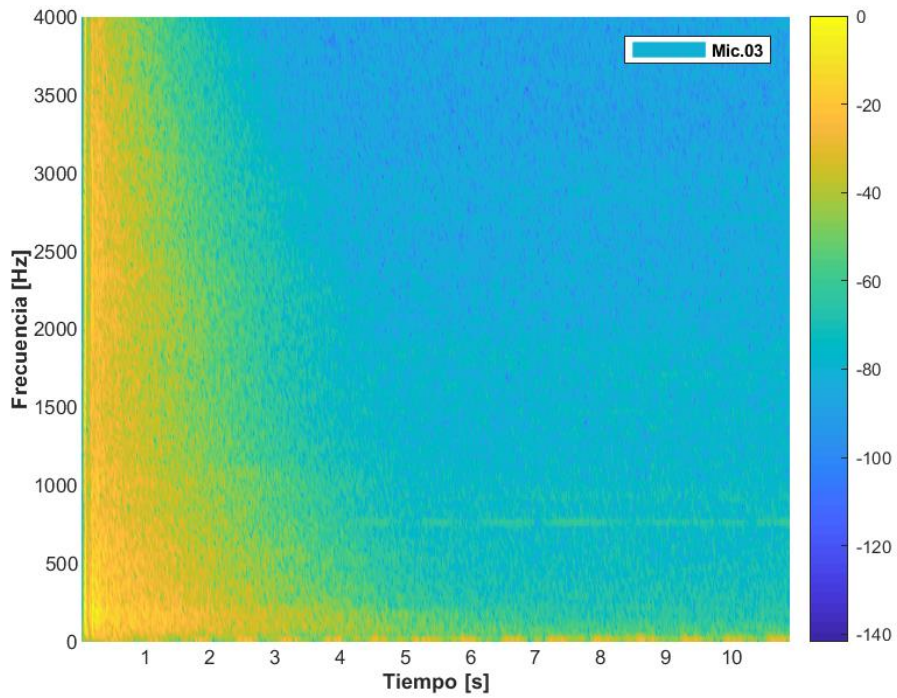


Figura 41

Espectrograma del micrófono 3 en pista (niveles de color en dB)

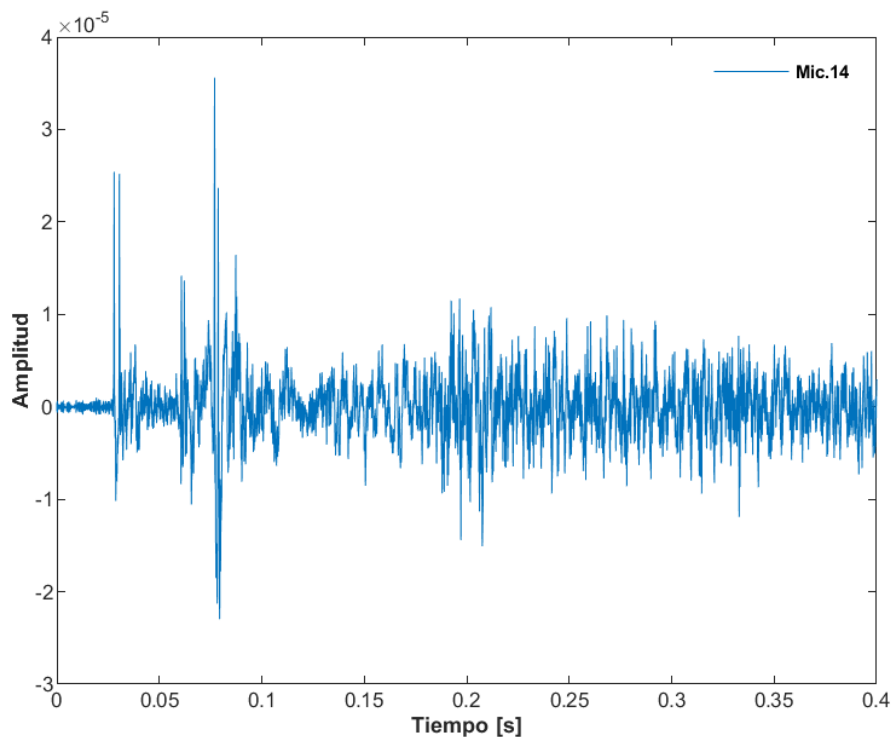


Dentro del intervalo de 0 a 4 kHz las frecuencias que van de 20 Hz a 250 Hz llegan a durar entre 9 y 7 segundos. Conforme aumenta la frecuencia el tiempo de duración disminuye ya que tienden a ser absorbidas con mayor facilidad. Además, es importante observar cómo dentro de los primeros 500 ms se tiene la mayor cantidad de energía.

De la misma manera se analiza el micrófono 14 ubicado en las gradas para identificar las diferencias que pueden observarse en comparación con la pista. En la figura 42 se muestra la respuesta a impulso obtenida mediante el procesamiento de la señal de barrido senoidal. Se observan los tres picos característicos de los altavoces, que aunque son cuatro dos de ellos llegan casi simultáneamente. Estos tres picos llegan en un intervalo de tiempo de 50 ms, ocurriendo a los 77 ms el último de ellos.

Figura 42

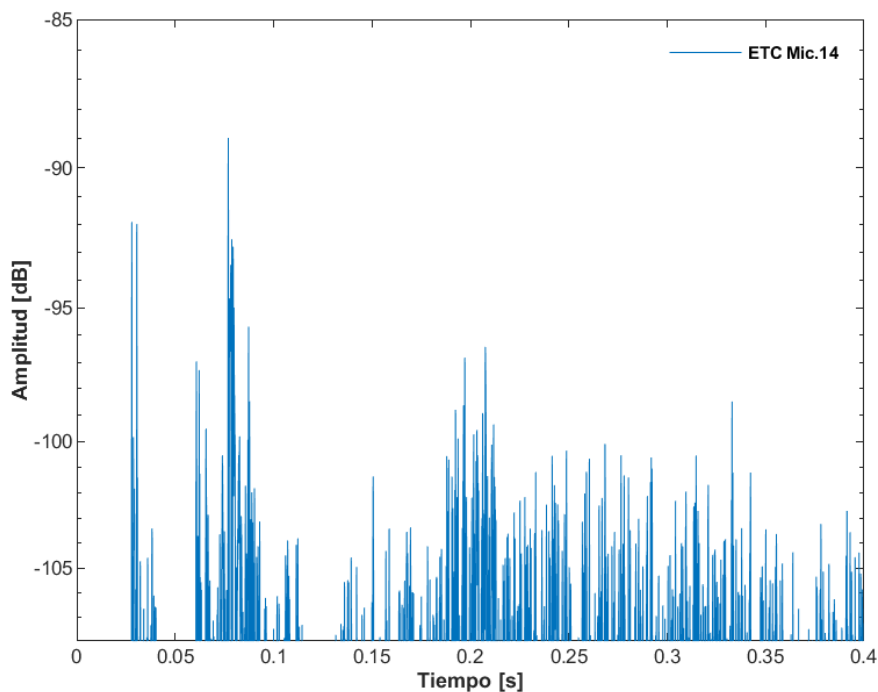
Señal de impulso del micrófono 14 en gradas



La gráfica de ETC se muestra en la figura 43. Se observa que inmediatamente después de los tres picos ya mencionados aparece otra reflexión a los 87 ms, seguida de otras reflexiones casi de igual intensidad. Esto denota una cantidad considerable de reflexiones de alguna superficie cercana. Ya que este canal se encuentra en las gradas, es muy probable que estas reflexiones provengan de la cúpula. Tal suposición se confirmará con el análisis de rayos en la simulación.

Figura 43

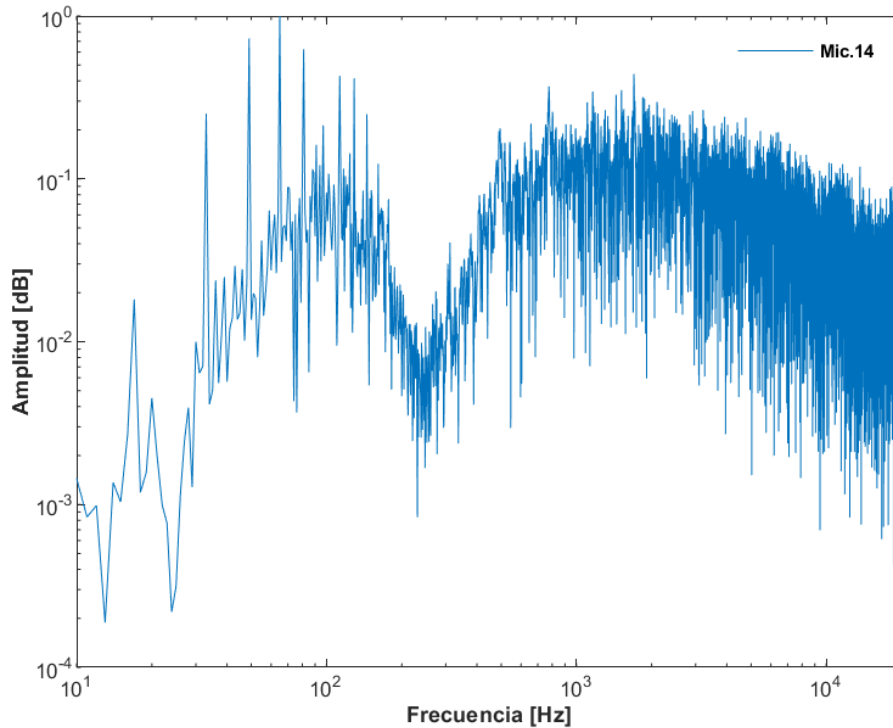
Gráfica ETC del micrófono 14 en gradas



Si se analiza su densidad espectral en la figura 44, se aprecia que este micrófono posee un alto contenido en frecuencias de 20 Hz a 5 kHz siendo las de 42 Hz, 65 Hz, 81 Hz, 776 Hz a 1.7 kHz las más altas.

Figura 44

Densidad espectral del canal 14 en gradas



La figura 45 muestra la respuesta en frecuencia del espectro sonoro, se comprueba que efectivamente en la banda de 4 kHz comienza el decaimiento de la intensidad de sonido en función de la frecuencia.

Con el espectrograma de la figura 46 muestra en el eje horizontal el tiempo en el eje vertical, la frecuencia y con colores la intensidad. Se observa que para las frecuencias más bajas se tienen tiempos de hasta 6 s.

Figura 45

Respuesta en frecuencia del micrófono 14 en gradas

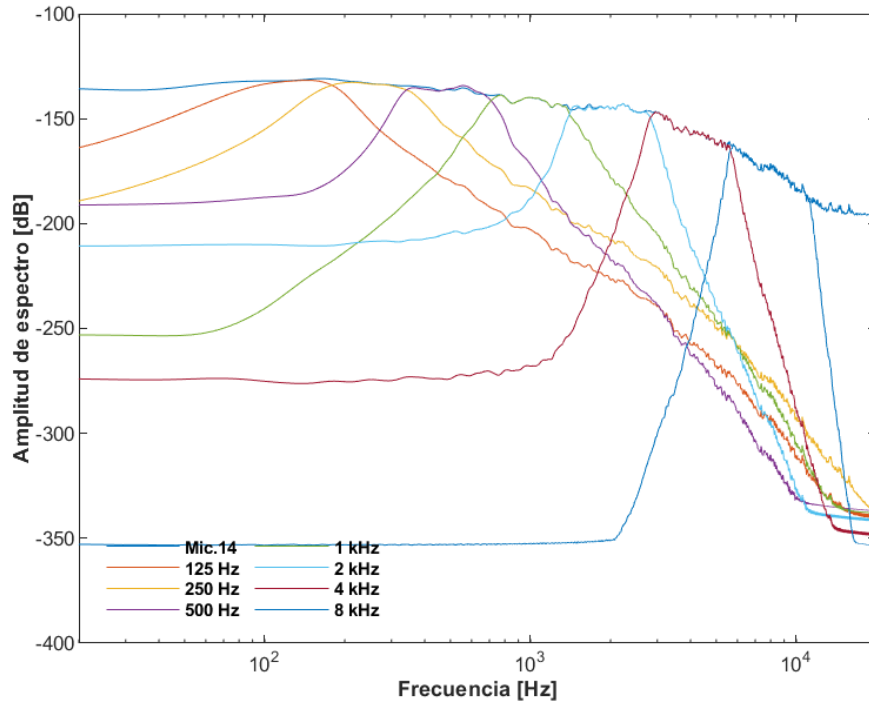
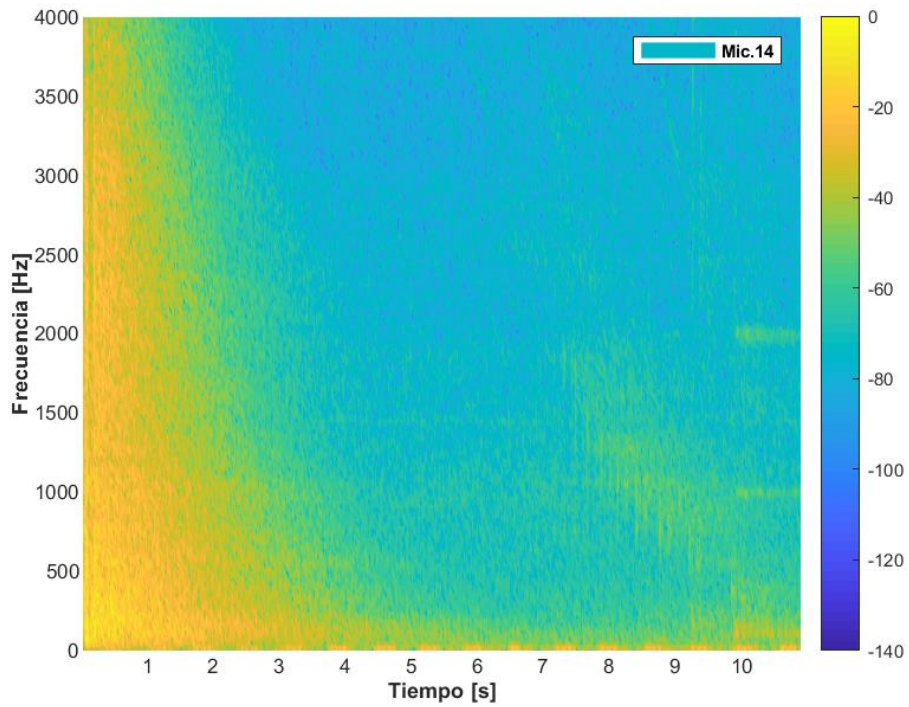


Figura 46

Espectrograma del micrófono 14 en gradas (niveles de color en dB)

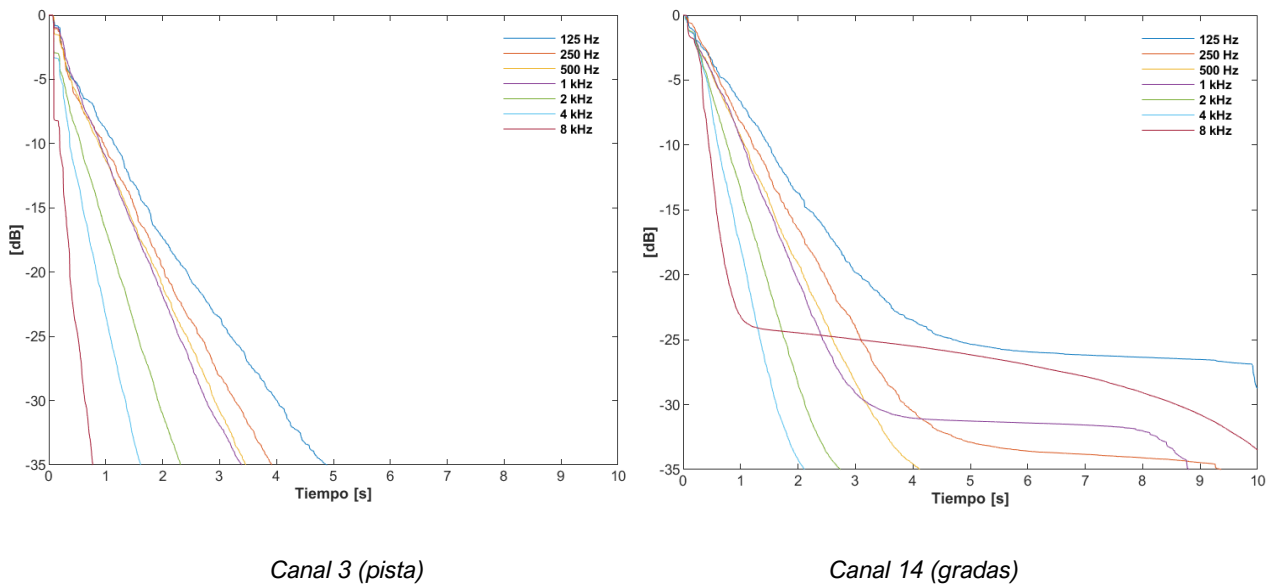


Curvas de decaimiento (Decay Curves)

Las curvas de decaimiento muestran cómo va decreciendo la intensidad del sonido en cada banda de frecuencia de una octava con respecto al tiempo. En estas gráficas se pueden observar con mayor facilidad parámetros como EDT, T20 y T30. Es importante notar que la pendiente de decaimiento es menos pronunciada en bajas frecuencias y va aumentando conforme aumenta la frecuencia. A continuación se muestran las curvas de decaimiento por banda de octava de los micrófonos 3 y 14 con la claqueta.

Figura 47

Curvas de decaimiento por bandas de octava de los micrófonos 3 (pista) y 14(gradas) de la señal de impulso



Como se ha mencionado, la pendiente de decaimiento se hace más pronunciada conforme aumenta la frecuencia tanto en la pista como en las gradas. En el eje horizontal se tiene el tiempo en segundos y en el eje vertical se tiene la intensidad en decibeles. La mayoría de las curvas de decaimiento de las gradas no alcanzan los 30 dB antes de que termine comienza el

nivel del ruido de fondo. Este comportamiento se observa especialmente en las bandas de octava de 125 Hz, 250 Hz y 1000 Hz. Por tal motivo, los cálculos para obtener T30 presentarán valores erróneos en esas bandas de frecuencia. Dadas estas observaciones, en las gradas consideraremos solamente EDT y T20 excluyendo T30. Otro punto a observar en las curvas de decaimiento de la pista y las gradas es que la pendiente es menor en las gradas, lo cual denota una menor influencia de las reflexiones tempranas.

EDT (Tiempo de decaimiento temprano)

Como se ha explicado, EDT es sensible a las primeras reflexiones y a la posición del escucha. Este parámetro describe cómo la reverberación de un recinto influye en la escucha de manera subjetiva. Por lo cual, podemos deducir que en las gradas se escucha una mayor reverberación. Se observa una pendiente de decaimiento de un segundo desde 250 Hz hasta 1000 Hz. En 1250 Hz la pendiente se incrementa a cerca de 3 segundos hasta 8000 Hz. Es notable en la gráfica la diferencia entre la pista y las gradas. Por lo que podemos inferir al observar esta gráfica que en las gradas hay una mayor cantidad de primeras reflexiones al estar más cerca del domo que la pista.

Los valores objetivos o representativos de EDT obtenidos son:

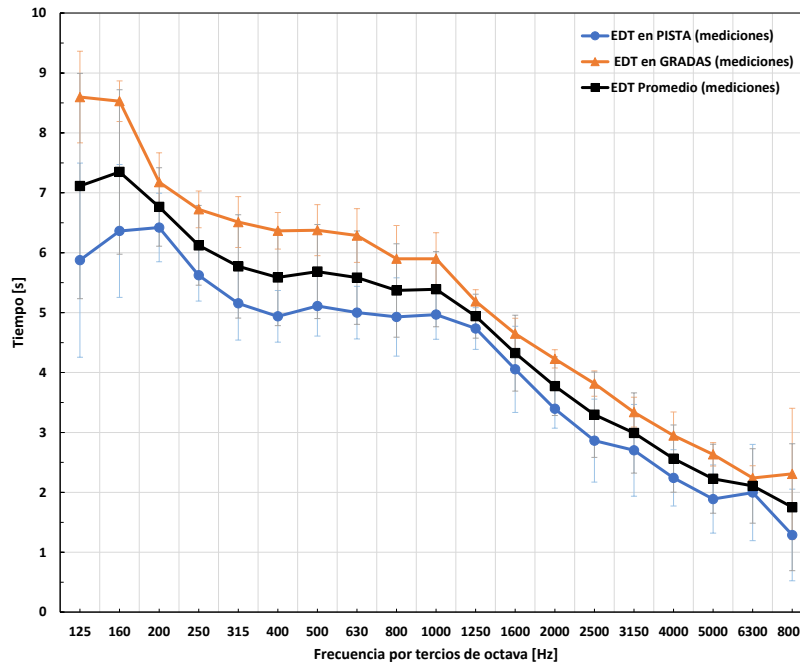
EDT $\text{mid}_{(500 - 1000 \text{ Hz})}$ pista = 5.03 s

EDT $\text{mid}_{(500 - 1000 \text{ Hz})}$ gradas = 6.13 s

EDT $\text{mid}_{(500 - 1000 \text{ Hz})}$ general = 5.53 s

Figura 48

Resultados de mediciones de EDT en pista y gradas



Nota: EDT en “pista y gradas” se obtuvo del promedio de los micrófonos, la línea correspondiente a “promedio” representa el promedio general. Datos obtenidos con el software EASERA.

T20 (Tiempo de reverberación)

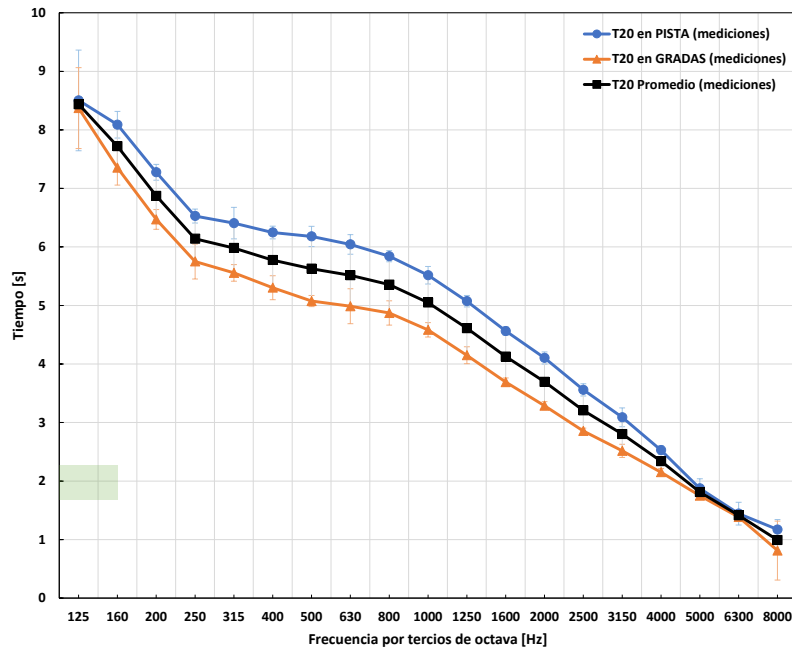
Con los datos obtenidos y representados en la figura 49, observamos un tiempo de reverberación alto en bajas frecuencias, por lo que se puede decir que se trata de un recinto opaco acústicamente hablando. La reverberación es mayor en la pista que en las gradas.

Los valores objetivos o representativos de T20 obtenidos son:

- T20 mid_(500 – 1000 Hz) pista = 5.84 s
- T20 mid_(500 – 1000 Hz) gradas = 4.82 s
- T20 mid_(500 – 1000 Hz) general = 5.33 s

Figura 49

T20 Resultados de mediciones en pista y gradas



Nota: T20 en “pista y gradas” se obtuvo del promedio de los micrófonos, la línea correspondiente a “promedio” representa el promedio general. Datos obtenidos con el software EASERA. La zona sombreada muestra el rango de valores recomendados por Niels Werner de T30 en 125 Hz para un recinto con el mismo volumen del Palacio de los Deportes.

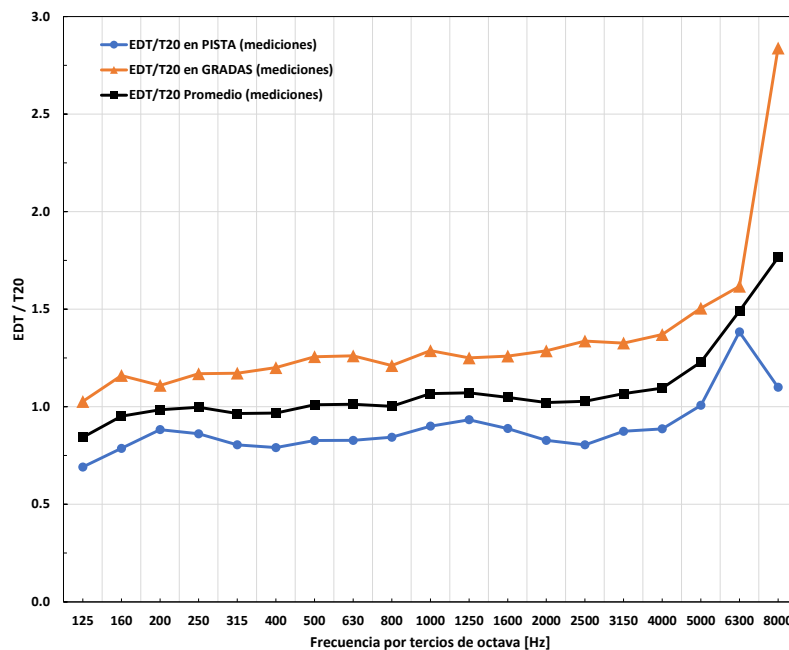
En la misma figura se muestra el promedio del tiempo de reverberación T20 entre la pista y las gradas. Los valores altos de T20 en las bajas frecuencias podrían ocasionar que el sonido de instrumentos como el bajo, el bombo y el tom de piso permanezcan escuchándose de cinco hasta siete segundos. Lo cual, puede significar un problema grave para la presentación de música rock y pop, ya que estos instrumentos son la base de este género musical.

Relación EDT/T20

Con el fin de valorar la cantidad de energía de primeras reflexiones comparado con la reverberación se realiza esta relación. En esta relación los valores mayores a uno, nos indican que el EDT es mayor a la reverberación. La siguiente figura nos muestra este fenómeno en las gradas, donde se tiene la sensación subjetiva de una mayor reverberación que en la pista. Se recomiendan valores cercanos a la unidad.

Figura 50

Relación EDT/T20



T30 (Tiempo de reverberación)

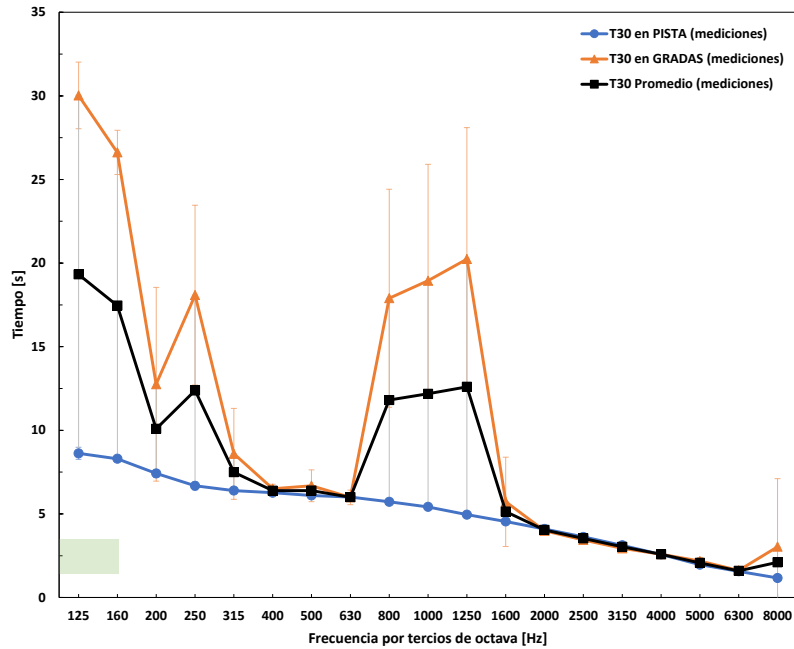
T30 al tener un mayor intervalo de tiempo y de rango de análisis que T20, presentó resultados no confiables en la zona de las gradas. Esto es muy probablemente debido a la lejanía de los micrófonos con respecto a la fuente y al ruido de fondo.

Los valores objetivos o representativos de T30 obtenidos son:

T30 mid_(500 – 1000 Hz) pista = 5.76 s
 T30 mid_(500 – 1000 Hz) gradas = 12.81 s
 T30 mid_(500 – 1000 Hz) general = 9.28 s

Figura 51

T30 Resultados de mediciones en pista y gradas



Nota: T30 en “pista y gradas” se obtuvo del promedio de los micrófonos, la línea correspondiente a “promedio” representa el promedio general. Datos obtenidos con el software EASERA. La zona sombreada muestra los valores recomendados por Niels Werner de T30 en 125 Hz para un recinto con el mismo volumen del Palacio de los Deportes.

Los valores de T20 y T30 en pista son muy similares a diferencia de las gradas donde T30 reporta resultados no confiables. Por lo tanto, el promedio general de T30 no se tomará en cuenta.

C50 (Claridad de la voz)

Los resultados muestran que la inteligibilidad presenta valores más próximos a lo recomendado en la pista que en las gradas. De la figura 52 se puede inferir que las voces de bajo, barítono y tenor tienen menor inteligibilidad que las voces altas como soprano. Sin embargo, ninguna gráfica llega al rango recomendado que es $C50 \geq 2$ dB correspondiente a la zona sombreada. El promedio general dista mucho de tener una claridad recomendada. De ahí que el público asistente mencione que no se logra entender en algunas ocasiones al cantante.

Los valores objetivos o representativos de claridad de la voz obtenidos son:

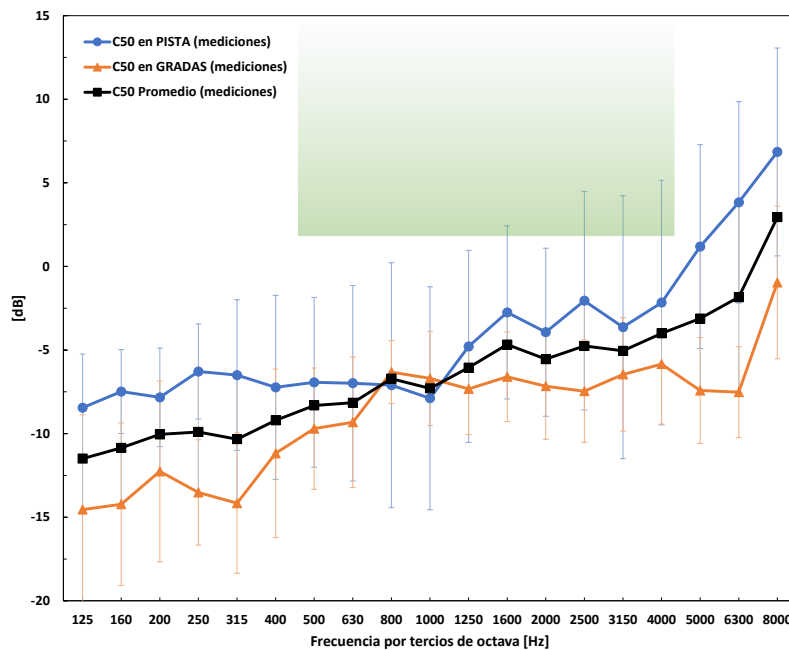
Claridad objetiva de la voz_(500-1000-2000-4000 Hz) en pista = -4.92 dB

Claridad objetiva de la voz_(500-1000-2000-4000 Hz) en gradas = -7.09 dB

Claridad objetiva de la voz_(500-1000-2000-4000 Hz) general = -6.01 dB

Figura 52

C50 Resultados de mediciones en pista y gradas



Nota: C50 en “pista y gradas” se obtuvo del promedio de los micrófonos, la línea correspondiente a “promedio” representa el promedio general. Datos obtenidos con el software EASERA. La zona sombreada muestra los valores recomendados según diferentes autores debe ser mayor a 2 dB.

C80 (Claridad Musical)

En cuanto a la claridad musical, el Palacio de los Deportes presenta valores por debajo de los recomendados especialmente en la zona de las gradas. En esta zona, al tener valores tan bajos en bajas frecuencias se tienen problemas con instrumentos como el bajo, el tom de piso, el bombo y algunas notas de la guitarra. La zona de pista también presenta valores bajos, sin embargo en las bandas de frecuencia de 1.6 kHz a 4 kHz se muestran valores dentro del rango. La recomendación de Beranek es mantener valores justo por debajo de cero.

La gráfica de promedio general se encuentra fuera del rango recomendado para la claridad musical, lo que denota un espacio muy reverberante.

Los valores objetivos o representativos de claridad musical obtenidos son:

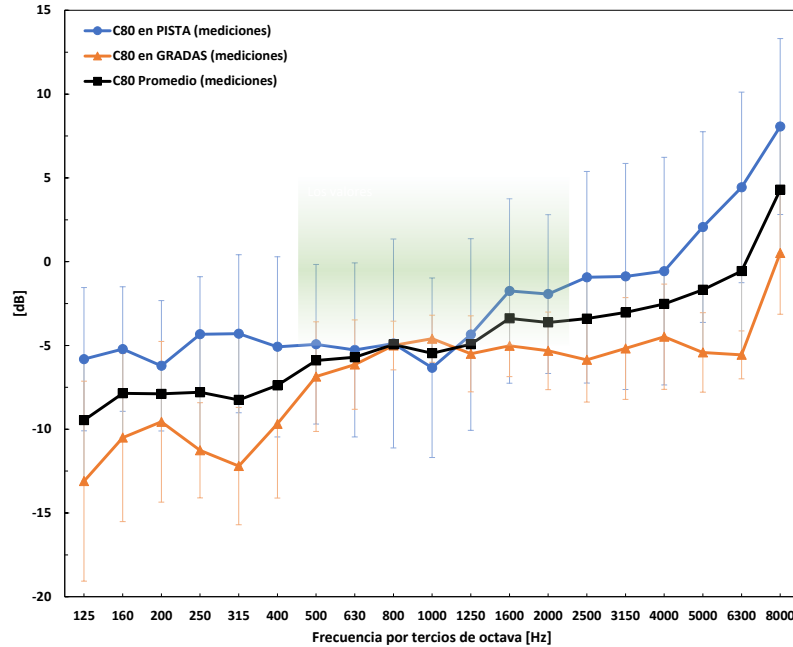
Claridad objetiva musical_(500-1000-2000 Hz) en pista = -4.4 dB

Claridad objetiva musical_(500-1000-2000 Hz) en gradas = -5.59 dB

Claridad objetiva musical_(500-1000-2000 Hz) general = -4.99 dB

Figura 53

C80 Resultados de mediciones en pista y gradas



Nota: C80 en “pista y gradas” se obtuvo del promedio de los micrófonos, la línea correspondiente a “promedio” representa el promedio general. Datos obtenidos con el software EASERA. Los valores en la zona sombreada son los recomendados por la norma ISO 3382:1 2009.

D50 (Definición)

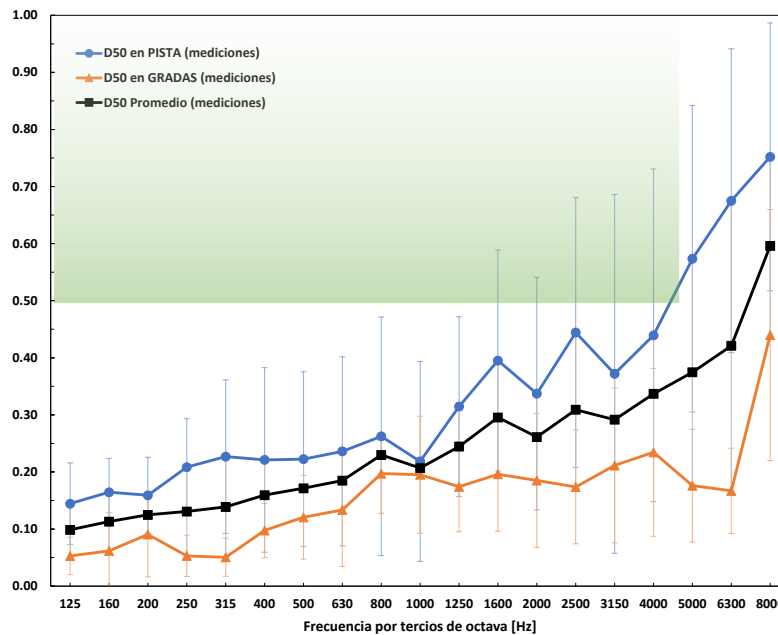
Las gráficas de la definición son muy similares a las gráficas de C50. De igual manera, los resultados revelan una mayor definición en la pista que en las gradas. Sin embargo, ninguna alcanza el criterio de ser mayor o igual al 50% o 0.5.

Los valores objetivos o representativos de Definición obtenidos son:

- Definición_(500-1000 Hz) en pista = 22.1%
- Definición_(500-1000 Hz) en gradas = 15.8%
- Definición_(500-1000 Hz) general = 18.9%

Figura 54

D50 Resultados de mediciones en pista y gradas



Nota: D50 en “pista y gradas” se obtuvieron del promedio de los micrófonos, la línea correspondiente a “promedio” representa el promedio general. Datos obtenidos con el software EASERA. Los valores en la zona sombreada son los recomendados por Ning Xiang (Xiang, 2017, p. 277) $D \geq 50\%$ o 0.5.

Ts (Tiempo Central)

Los valores representados en las gráficas muestran tiempos muy altos con respecto a las recomendaciones. Recordemos que el tiempo central es un punto en el eje temporal que nos indica el equilibrio entre la energía temprana y la tardía para cada banda de frecuencia. Estos valores nos describen un espacio muy reverberante y con poca claridad.

Los valores objetivos o representativos del tiempo central obtenidos son:

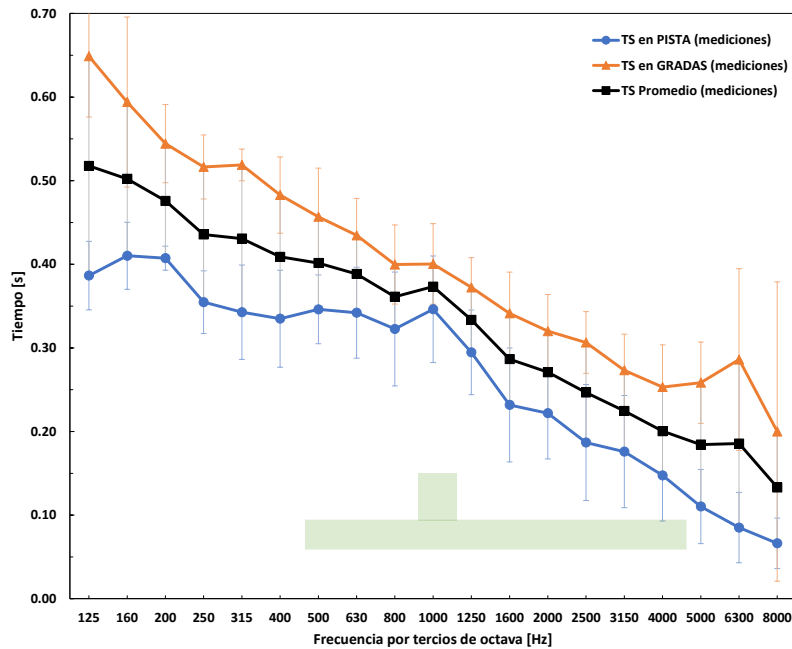
Tiempo central_(500-1000 Hz) en pista = 0.346 s

Tiempo central_(500-1000 Hz) en gradas = 0.429 s

Tiempo central_(500-1000 Hz) general = 0.387 s

Figura 55

TS Resultados de mediciones en pista y gradas



Nota: TS en “pista y gradas” se obtuvieron del promedio de los micrófonos, la línea correspondiente a “promedio” representa el promedio general. Datos obtenidos con el software EASERA. Los valores en la zona sombreada son los recomendados por Ning Xiang (Xiang, 2017, p. 285).

ITDG (Intimididad)

La intimididad depende de la posición de cada micrófono y de su cercanía con alguna superficie en particular. Por lo tanto, el tiempo de llegada del primer reflejo significativo será diferente en cada micrófono. En este caso, el primer reflejo significativo es el del piso. Sin embargo, este llega casi al mismo tiempo que el sonido directo, con una diferencia de entre uno y dos milisegundos lo que es benéfico para la inteligibilidad del sonido. Esto es, gracias al corto tiempo entre ellos, el cerebro humano lo interpreta como uno solo. Por otro lado, al integrarse como un solo sonido tenemos un refuerzo sonoro pero no aporta una sensación de espacialidad.

Por lo anterior se presentan a continuación los tiempos de las segundas reflexiones de primer orden con respecto al sonido directo provenientes de algún muro, del domo o de las gradas.

Tabla 10

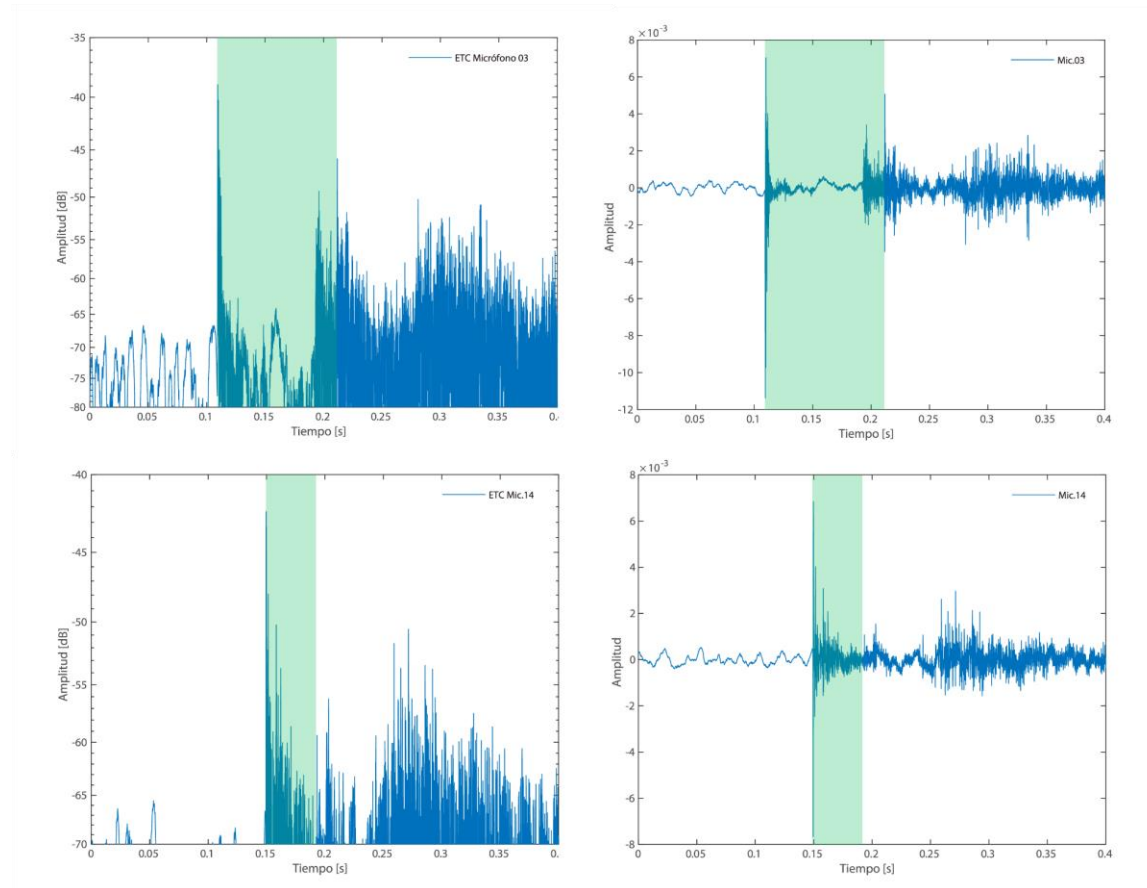
Valores medidos de ITDG

Micrófono	ITDG	Micrófono	ITDG
1	137.5 ms	9	101.28 ms
2	137.5 ms	10	101.28 ms
3	102 ms	11	x
4	139.25 ms	12	88.49 ms
5	110.77 ms	13	99.67 ms
6	131.48 ms	14	43.0 ms
7	106.09 ms	15	101.23 ms
8	106.09 ms	16	101.23 ms

Beranek recomienda un $ITDG \leq 20$ ms, la segunda reflexión que muestra la tabla presenta valores por arriba de los recomendado.

Figura 56

Ejemplo de ITDG para micrófonos 3 y 14.



Método de medición de la inteligibilidad

Antes de comenzar con el cuestionario de inteligibilidad se realizó a los participantes una audiometría con el audiómetro B&K modelo 1800 (1046194) para evaluar su salud auditiva. Ambas pruebas se realizaron en los laboratorios del ICAT en condiciones de silencio y con audífonos. Una vez realizada la audiometría se pidió a los participantes completar un formulario de Google Forms que contiene los audios previamente instalados en YouTube con 125 frases de no más de 10 palabras a evaluar (Orduña Bustamante et al., 2023). Estos audios fueron procesados para incluir la reverberación del Palacio de los Deportes de la ciudad de México tanto

en la pista como en las gradas además de la respuesta impulso de la Cámara Reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la UNAM. Se le pidió a los participantes escribir la frase reproducida tal cual la escuchó o en su defecto marcar con una “X” si no entendió alguna o ninguna palabra. Se aplicó la prueba a 22 participantes, 16 hombres y 6 mujeres entre 23 y 43 años de edad. Después de analizar las audiometrías se eliminaron cuatro participantes que mostraron umbrales de audición fuera de lo normal, teniendo finalmente 18 participantes con audición normal.

Pruebas de inteligibilidad

Los resultados obtenidos del formulario se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11

Resultados de pruebas de inteligibilidad

	Pista Mic. 4	Gradas Mic 4	Cámara Reverberante
Porcentaje de inteligibilidad (%)	41.6	11.7	7

Los resultados revelan un porcentaje de inteligibilidad mayor en la pista comparado con el porcentaje obtenido en las gradas. Por lo anterior, se concluye que la inteligibilidad del habla no es suficiente ya que sólo se entendió el 41.6% del mensaje en el mejor de los casos.

Resumen de resultados de las mediciones

En general, ninguno de los parámetros acústicos se encuentra dentro del rango de valores sugeridos por diferentes autores ni por la norma ISO 3382. En las gradas no se obtuvo el parámetro de T30 debido a que la gráfica de decaimiento llegaba antes de los 30 dB por lo que se toma como promedio general el promedio obtenido en la pista. Los resultados obtenidos

muestran que los valores más alejados de lo recomendado son los de las gradas con una mayor reverberación y una menor claridad y definición que en la pista.

Tabla 12

Resumen de parámetros acústicos obtenidos en las mediciones

	EDT [s]	T20 [s]	EDT/T20	T30 [s]	EDT/T30	C50 dB	C80 dB	D50 %	TS [ms]
Pista	5.03	5.84	0.86	5.76	0.87	-4.92	-4.4	22.1	0.34
Gradas	6.13	4.82	1.27			-7.09	-5.59	15.8	0.42
Promedio	5.53	5.33	1.03	5.76	0.87	-6.013	-4.99	18.9	38

Simulación del Palacio de los Deportes con el método de trazado de rayos

La simulación se realizó con el software Rhinoceros 7.0, se utilizó el plugin de Pachyderm para la obtención de parámetros acústicos así como para el trazado de rayos. El plugin Grasshopper se utilizó para realizar una animación de los reflejos de sonido. Se introdujeron los mismos parámetros que se utilizaron para los cálculos: volumen, temperatura, presión y coeficientes de absorción. De igual modo, se realizó la simulación incluyendo la lona y los asientos cubiertos. Los micrófonos y las fuentes se colocaron en la misma posición especificada en las mediciones.

Volumen	444,194.5 m ³
Temperatura	22.1 °C
Humedad Relativa	48.7%
Presión Atmosférica	776.7 hPa

Para realizar la simulación se debe especificar otra serie de parámetros que solicita el programa:

Reflect Order: 1
Raytracing Solution: Minimum Conver
Number of rays: 100,000
Cut-off Time: 4,500
Method: ISO 9613-1 (Outdoor Attenuation)

Se recomienda que el número de rayos sea el resultado de multiplicar el volumen del recinto por un factor entre 25 y 50. Sin embargo, en este caso al multiplicar el volumen por 25 obtenemos la cifra de 11,104,862.5 rayos, lo cual resulta ser una cifra que no admite el programa ya que éste sólo acepta hasta 500,000 rayos. Con la cantidad de 500,000 rayos se presentaron fallas en la ejecución del programa, por lo que se redujo a 100,000 rayos. El tiempo de corte o

“Cut-off Time” se recomienda que sea el 75% o el 100% del tiempo de reverberación estimado o anticipado. Por lo cual, si estimamos un tiempo promedio de 6 segundos, entonces el 75% es de 4,500 ms. Las características del equipo de cómputo usado para la simulación son las siguientes:

Laptop: MSI-GF75 Thin 95D

Procesador: Intel Core i7-9750H CPU @ 2.6 GHz

RAM 16 GB

Sistema Operativo: Windows 10, 64 bits

Tarjeta Gráfica: GeForce GTX 1660 Ti, 6 GB, 192 Bits, 1500 a 1770 MHz

La simulación ofrece la posibilidad de realizar un análisis de reflejos de sonido por el método de “trazado de rayos”. En este método, se observa cómo interactúa el sonido con la arquitectura del lugar. La geometría de la cúpula, las gradas y la pista provocan reflexiones de las que de otra forma no sería posible identificar sus trayectorias solamente con base en las mediciones o cálculos. Con el método de trazado de rayos se pueden seguir dichas trayectorias e identificar el tiempo y la intensidad con la que llegan a los micrófonos. Gracias a la simulación es posible obtener una gráfica de ETC que permite determinar el tiempo de llegada de las reflexiones así como su intensidad.

Resultados de las simulaciones

Análisis de reflejos (método de trazado de rayos)

Este análisis se realizó en los puntos en donde se encontraba cada micrófono. A continuación se muestra el análisis del micrófono 1 ubicado en la pista y el micrófono 15 ubicado en las gradas durante los primeros 400 ms. En la siguiente figura 57 observamos las primeras reflexiones que llegan al micrófono provenientes de una sola fuente. Para este estudio de trazado

de rayos se eligió la claqueta como fuente con el objetivo de posteriormente compararla con las mediciones. Ambos, emisor y receptor se encuentran en la pista. Los micrófonos 1 y 2 tienen la misma posición, por lo cual para el micrófono 2 no se realiza el análisis de rayos. Lo mismo pasa con los micrófonos 7 y 8 en el que se omite el micrófono 8. En las gradas se procede de la misma manera para los micrófonos 9, 10, 15 y 16 en los que se omiten el 10 y 16.

Tabla 13

Distancia entre micrófono y fuente (claqueta)

Micrófono	Distancia	Micrófono	Distancia
1	32.52 m	9	60.79 m
2	32.52 m	10	60.79 m
3	37.53 m	11	66.93 m
4	16.08 m	12	59.00 m
5	33.79 m	13	54.12 m
6	20.13 m	14	51.77 m
7	19.92 m	15	67.87 m
8	19.92 m	16	67.00 m

La mayoría de las primeras reflexiones en la pista provienen de los muros perimetrales que la delimitan. En la gráfica ETC se aprecia que estas reflexiones se encuentran dentro de los primeros 400 ms del total del tiempo.

Figura 57

Análisis de reflejos y curva ETC micrófono 1 ubicado en pista

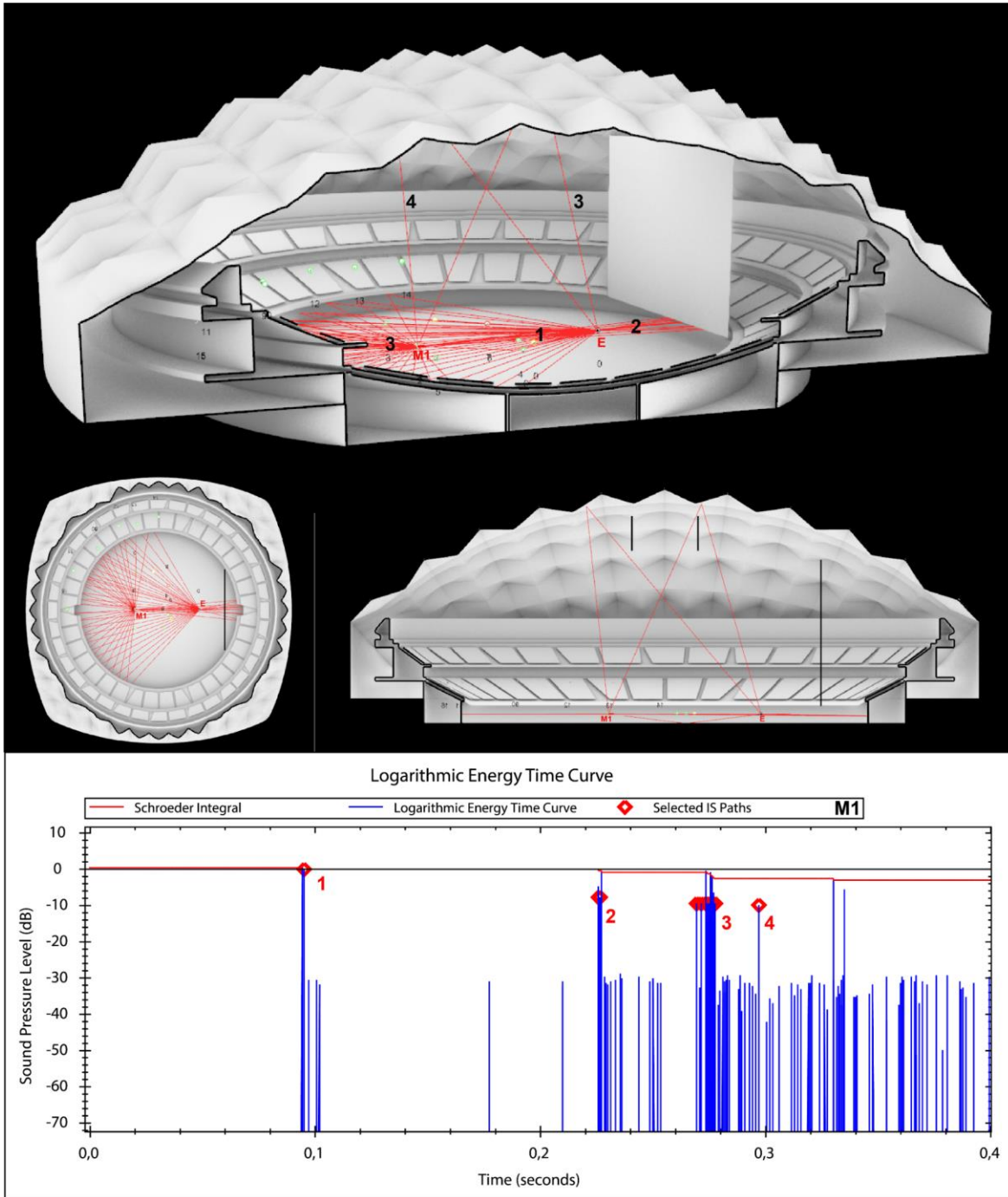
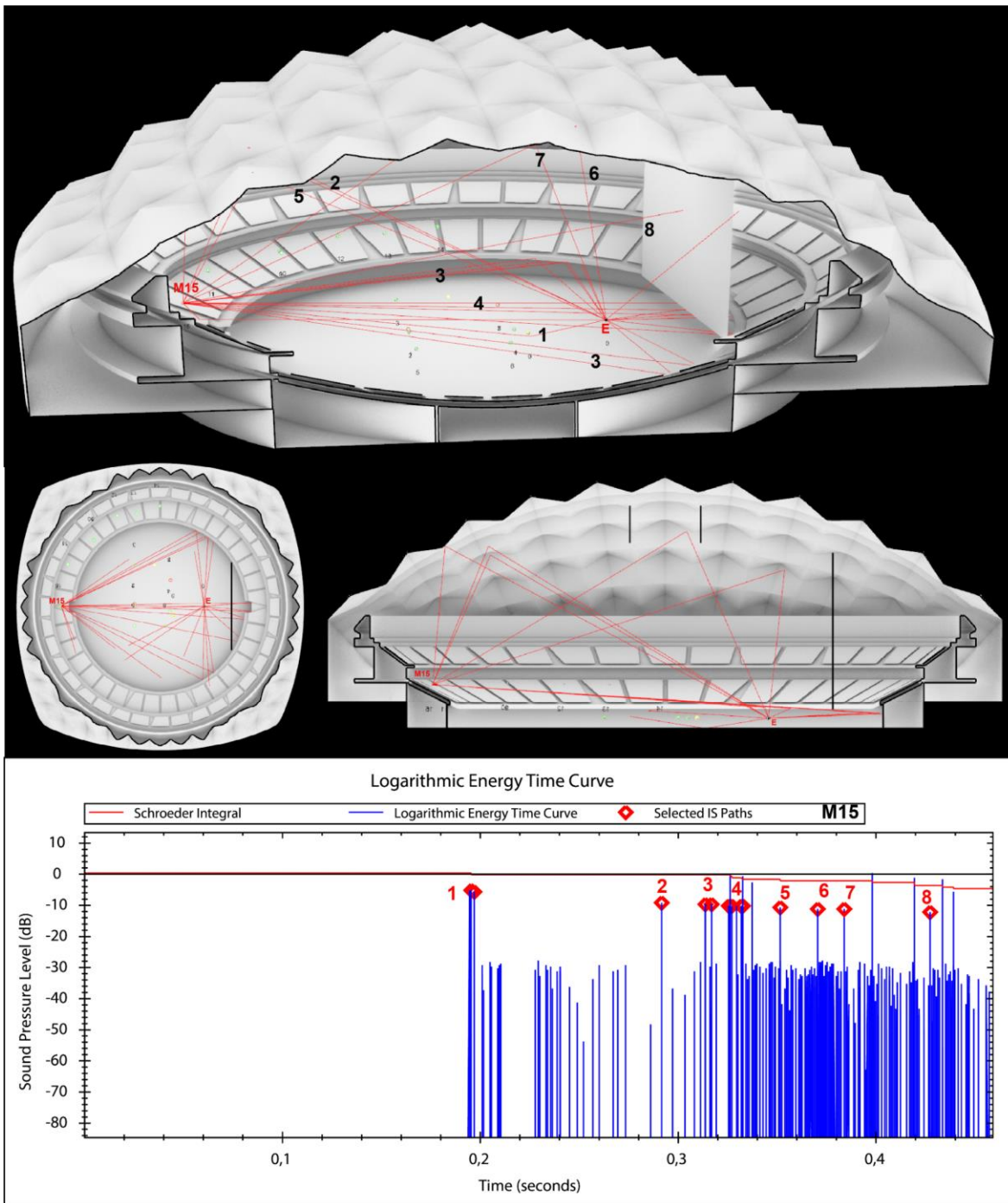


Figura 58

Análisis de reflejos y curva ETC micrófono 15 ubicado en gradas



En el caso del micrófono 1 en la pista se observa el primer reflejo proveniente del piso junto con el sonido directo. Posteriormente las reflexiones del muro perimetral en el área debajo de la lona. Como terceras reflexiones la parte frontal del muro perimetral y la cúpula, el cuarto reflejo proviene de la cúpula. Es importante notar la manera en que las terceras reflexiones se encuentran en mayor cantidad y muy juntas en el tiempo. Lo anterior es producto de una focalización entre el muro perimetral debido a su forma circular y a la cúpula.

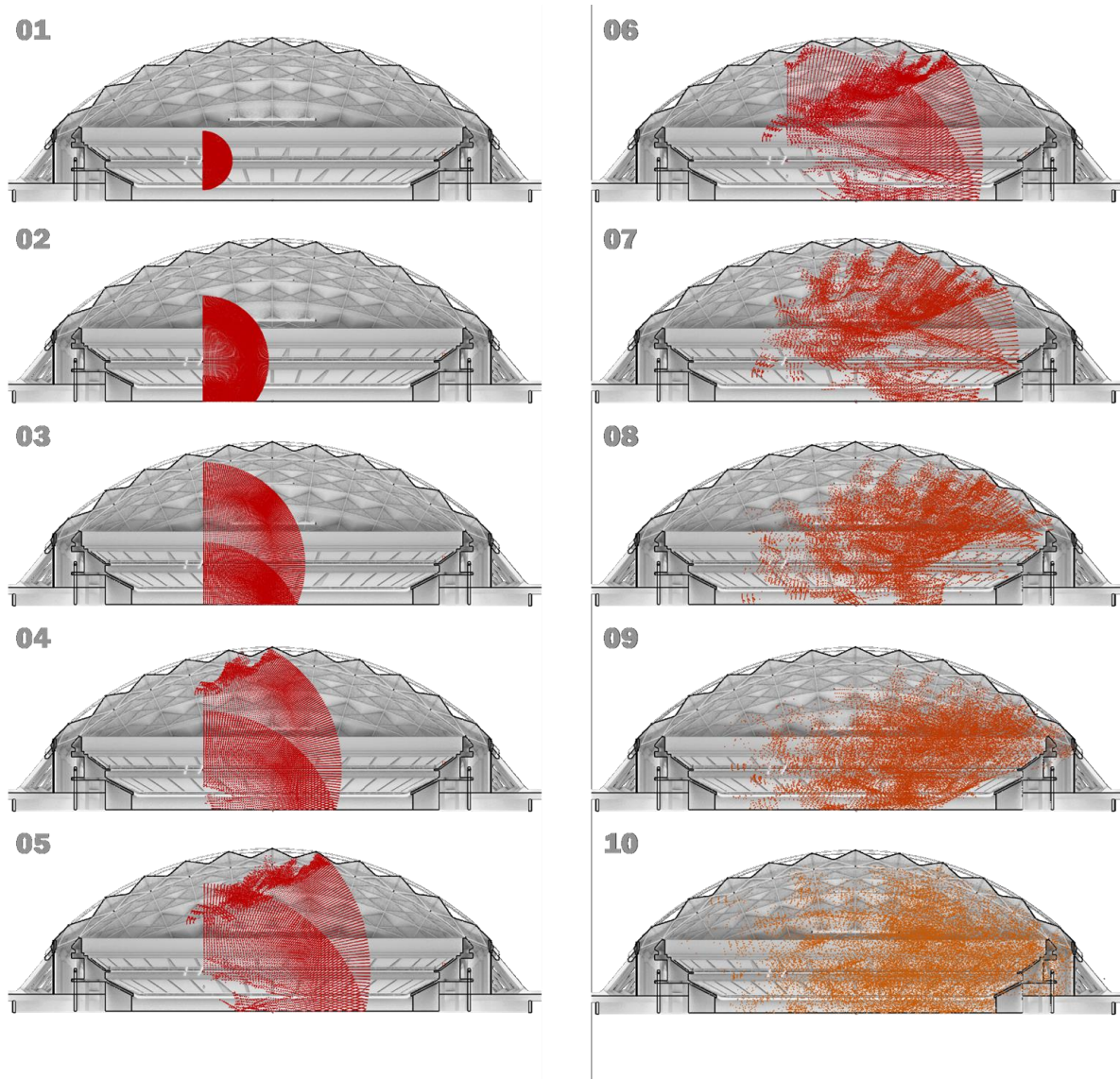
En el micrófono 15 ubicado en las gradas llega el sonido directo junto con el reflejo del piso de la pista y el piso de las gradas. Posteriormente la segunda reflexión de la parte baja de la cúpula. Las terceras reflexiones provienen de las gradas. El muro perimetral de la pista es causante de la cuarta reflexión. Por último, los reflejos 5, 6, 7 y 8 provienen de diferentes partes de la cúpula.

En las gradas es mayor la cantidad de reflejos y la diferencia de tiempo entre ellos es muy poca. Esto es, una focalización en su mayor parte debido a la cúpula. En la pista las focalizaciones son en su mayoría debido al muro perimetral. Analizando los reflejos de los micrófonos 1, 15 de la simulación se concluye que la cúpula y la forma circular de la gradería generan focalizaciones. Estas focalizaciones se hacen más intensas en las gradas debido a que la cúpula captan la mayor parte de los reflejos de así como también de la gradería.

En la figura 59 se muestra una serie de cuadros pertenecientes a una animación realizada en Rhinoceros con ayuda del plugin Grasshoper que describen el comportamiento de la onda sonora dentro del recinto.

Figura 59

Animación de reflexiones



A continuación se muestran los parámetros acústicos obtenidos en la simulación. Las gráficas y valores representan los promedios de los ocho micrófonos en la pista y los ocho micrófonos en las gradas así como un promedio de ambas zonas. Valores obtenidos con el software Rhinoceros y plugin Pachyderm.

EDT (tiempo de decaimiento temprano)

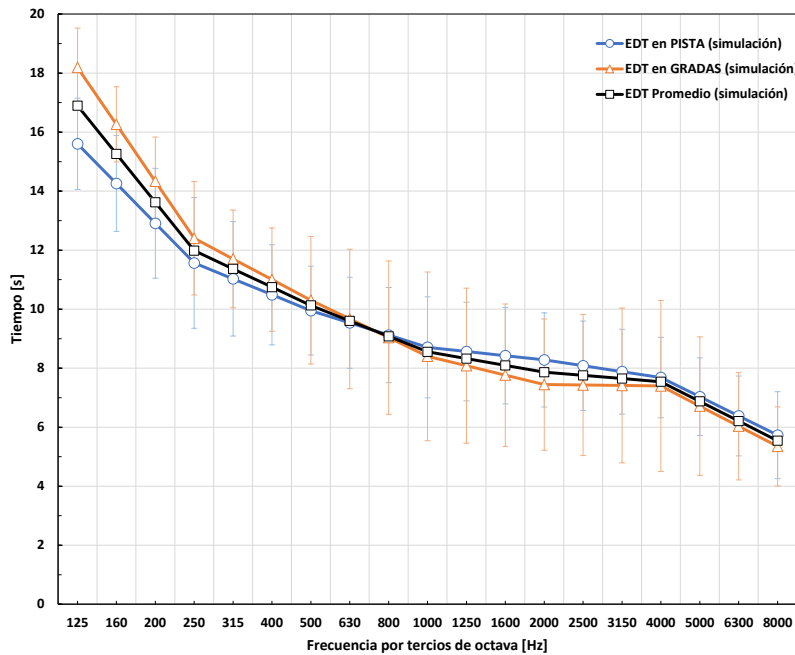
La simulación muestra que en las gradas existe una mayor cantidad de primeras reflexiones que en la pista de 125 Hz a 530 Hz. Sin embargo, los valores son muy altos en ambos lugares.

Los valores objetivos o representativos de EDT obtenidos en las simulaciones son:

- EDT mid_(500 – 1000 Hz) pista = 9.33 s
- EDT mid_(500 – 1000 Hz) gradas = 9.35 s
- EDT mid_(500 – 1000 Hz) general = 9.34 s

Figura 60

EDT resultados de simulaciones en pista y gradas



T20 (Tiempo de reverberación)

El tiempo de reverberación T20 muestra ser mayor en las gradas que en la pista a diferencia de las mediciones. Esto se debe principalmente a que el cálculo del tiempo de

reverberación en el programa se ve afectado por la intensidad relativa inicial de los rayos sonoros que disminuye más gradualmente en las gradas, en donde el sonido directo es de intensidad similar al de las reflexiones subsecuentes y el programa estima un mayor tiempo de reverberación, pero que disminuye más abruptamente en la pista, en donde el sonido directo es mucho más intenso que las reflexiones subsecuentes y el programa estima un menor tiempo de reverberación. Esto no ocurre en los otros métodos que estiman el tiempo de reverberación a partir de un decaimiento inicial, típicamente de 5 decibeles, que se ignora para evitar el comportamiento inicial del sonido directo y las primeras reflexiones que puede ser irregular y causar problemas, como al parecer sucede en este caso.

Los valores objetivos o representativos de T20 obtenidos en las simulaciones son:

T20 mid_(500 – 1000 Hz) pista = 7.95 s
 T20 mid_(500 – 1000 Hz) gradas = 10.36 s
 T20 mid_(500 – 1000 Hz) general = 9.15 s

Figura 61

T20 Resultados de simulaciones en pista y gradas

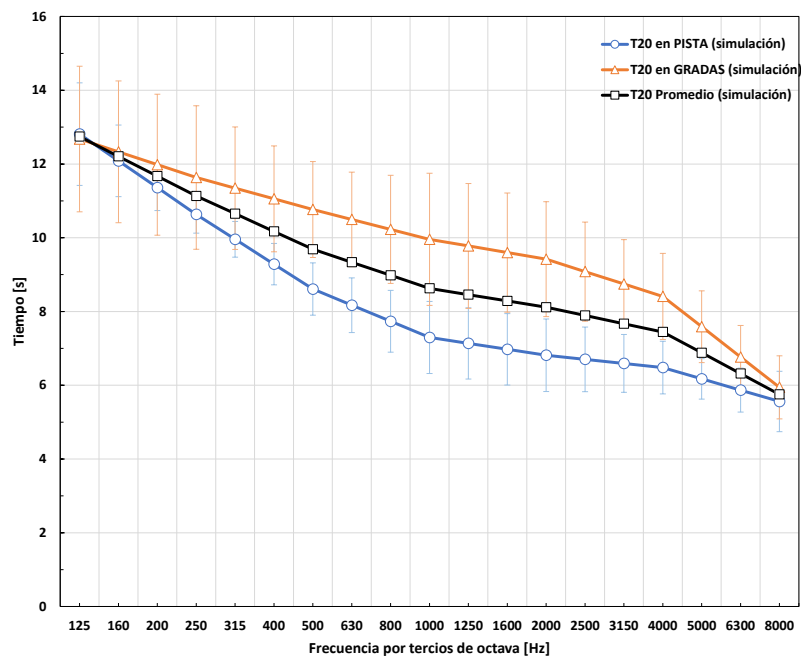
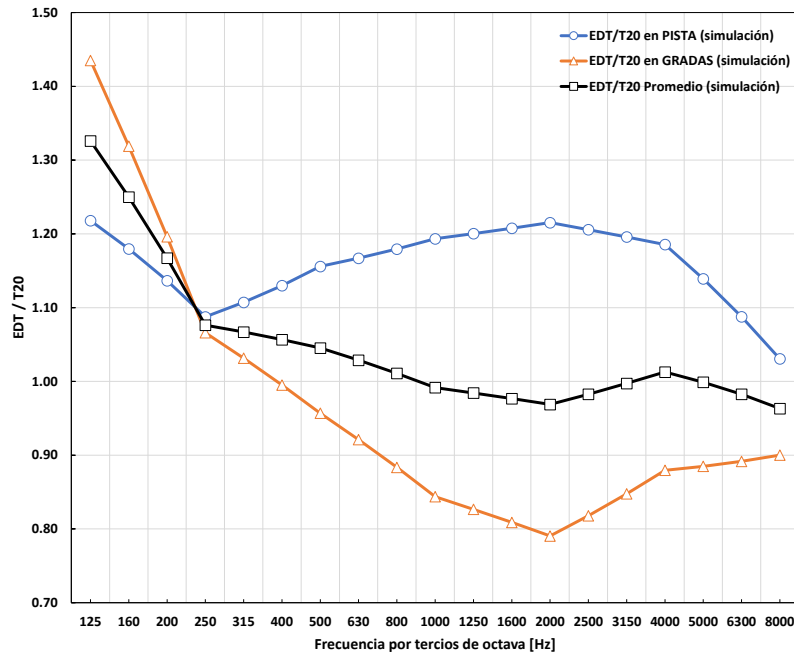


Figura 62

Relación EDT/T20 de simulaciones en pista y gradas



T30 (Tiempo de reverberación)

De manera similar a T20 que se obtuvo en las simulaciones, T30 muestra ser mayor en las gradas que en la pista. En ambos casos los valores son más altos en bajas y medias frecuencias. Lo cual sigue siendo un problema para instrumentos musicales que tienen su rango de frecuencias en esa zona.

Los valores objetivos o representativos de T30 obtenidos en las simulaciones son:

- T30 mid_(500 – 1000 Hz) pista = 7.42 s
- T30 mid_(500 – 1000 Hz) gradas = 8.56 s
- T30 mid_(500 – 1000 Hz) general = 8.14 s

Figura 63

T30 Resultados de simulaciones en pista y gradas

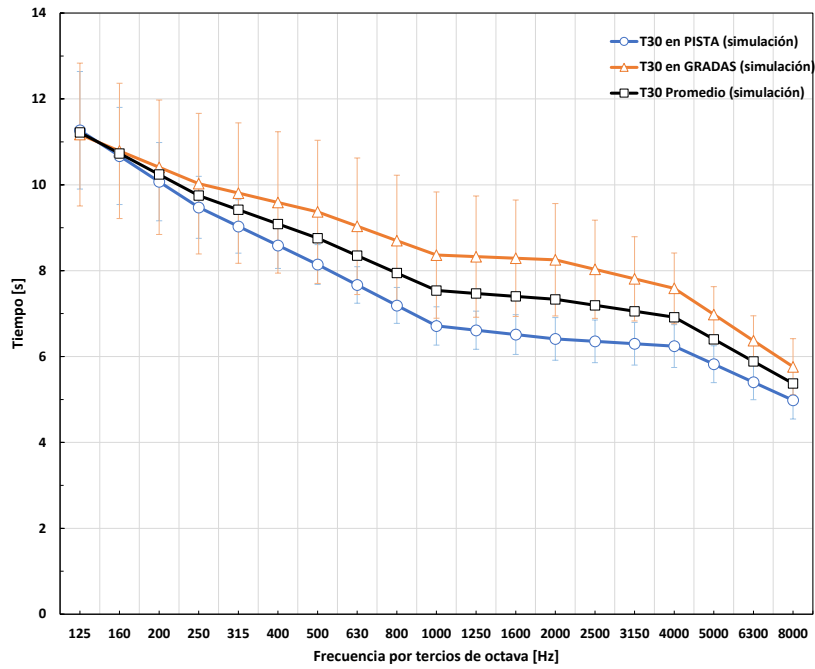
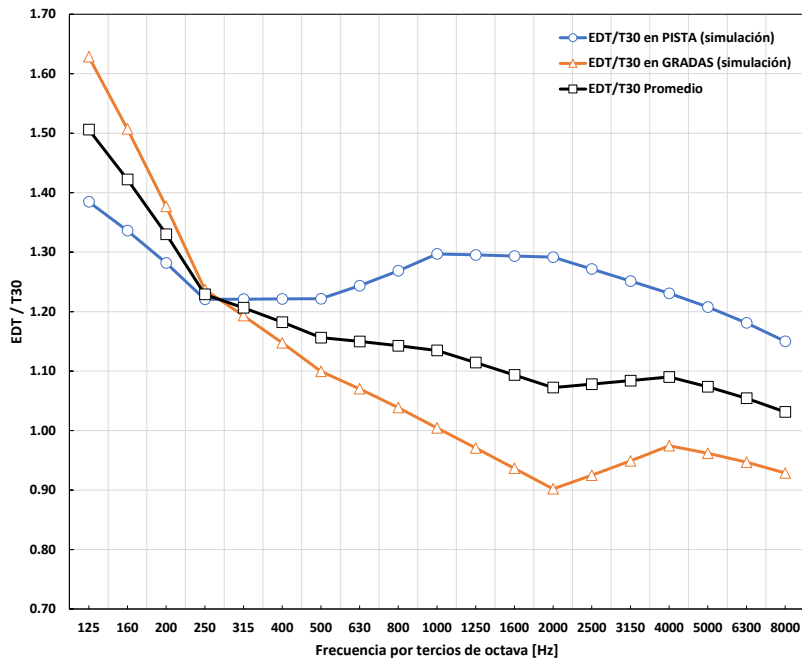


Figura 64

Relación EDT/T30 de simulaciones en pista y gradas



En la relación EDT/T30 recordamos que valores menores a la unidad darán la sensación subjetiva de un ambiente más absorbente; caso contrario valores mayores a la unidad darán la sensación de ser más reflejante. En este caso se muestra que la mayoría de los valores se encuentran por arriba de la unidad, lo cual denota un ambiente subjetivamente reflejante. Únicamente en las gradas en el ancho de banda de 1.25 kHz a 4 kHz muestra un comportamiento absorbente. Lo anterior puede ser debido a la atenuación de altas frecuencias en el aire y a la distancia de la fuente. Cabe destacar el cambio de comportamiento de esta relación antes y después de la banda de 250 Hz. Los valores anteriores a este punto muestran que en las gradas se percibe subjetivamente una mayor cantidad de reflexiones en las gradas en bajas frecuencias.

C50 (Claridad de la voz)

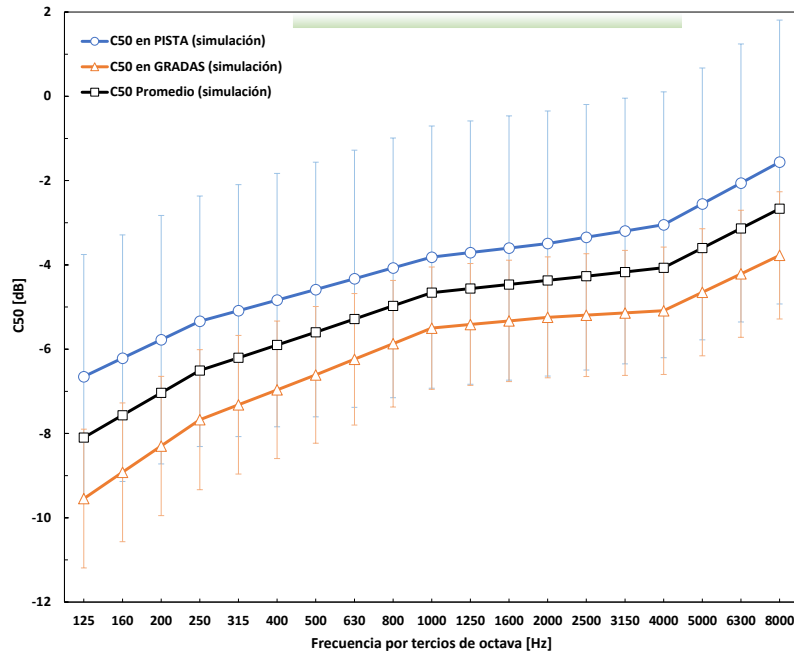
Los valores obtenidos para la claridad de la voz están muy por debajo de las recomendaciones tanto en las gradas como en la pista. La recomendación establece valores por arriba de los 2 dB.

Los valores objetivos o representativos de C50 obtenidos en las simulaciones son:

C50 mid_(500-1000-2000 Hz) pista = -3.62 dB
C50 mid_(500-1000-2000 Hz) gradas = -5.47 dB
C50 mid_(500-1000-2000 Hz) general = -4.55 dB

Figura 65

C50 Resultados de simulaciones en pista y gradas



C80 (Claridad musical)

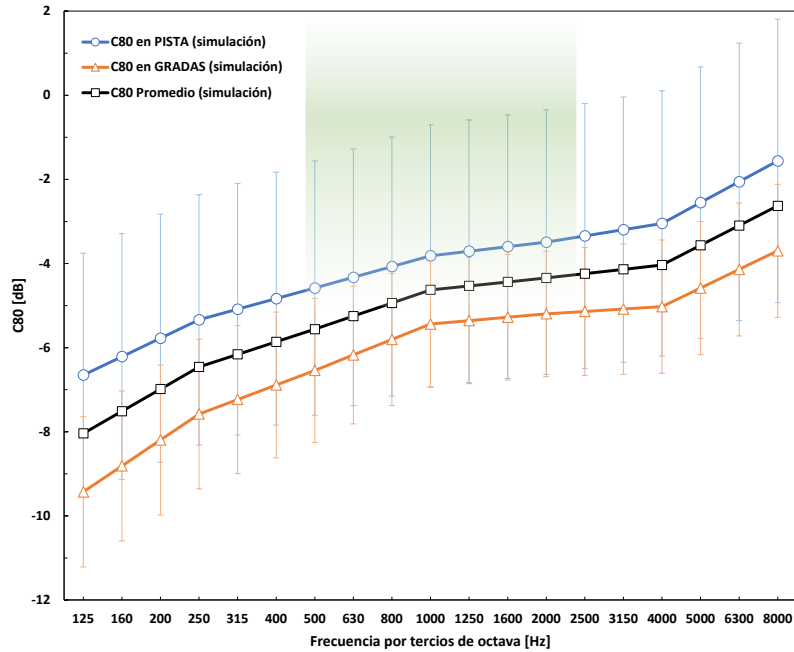
La claridad musical se encuentra fuera del rango recomendable tanto en gradas como en la pista. Las zonas sombreadas en las gráficas muestran el rango recomendable de claridad musical. La pista muestra una claridad mayor en la pista que en las gradas. Sin embargo, se puede observar en el promedio general cómo el recinto en general se encuentra fuera del la zona recomendada. El recuadro verde en la gráfica muestra que el rango recomendado son valores cercanos a 0 dB.

Los valores objetivos o representativos de claridad musical obtenidos son:

- Claridad objetiva musical_(500-1000-2000 Hz) en pista = -3.96 dB
- Claridad objetiva musical_(500-1000-2000 Hz) en gradas = -5.72 dB
- Claridad objetiva musical_(500-1000-2000 Hz) general = -3.96 dB

Figura 66

C80 Resultados de simulaciones en pista y gradas



D50 (Definición)

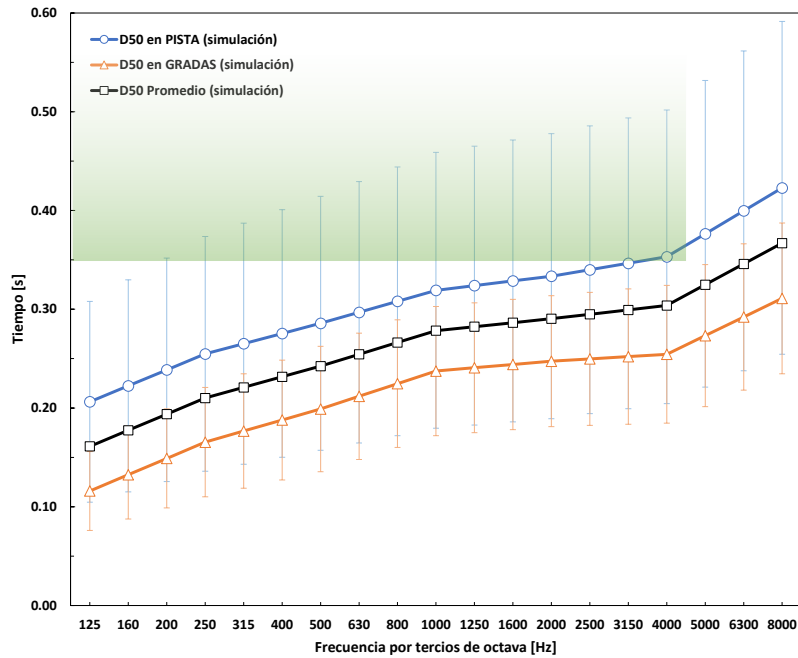
Similar a la claridad de la voz, los valores de este parámetro se encuentran fuera del rango recomendado el cual dice que los valores deben ser mayores a 0.5 o 50%. Esta recomendación se ilustra con la zona sombreada en la gráfica. Recordando, la definición nos da la sensación de nitidez, la cual es mejor en la pista que en las gradas.

Los valores objetivos o representativos de definición obtenidos son:

- Definición_(500-1000 Hz) en pista = 30.2%
- Definición_(500-1000 Hz) en gradas = 21.8%
- Definición_(500-1000 Hz) general = 26%

Figura 67

D50 Resultados de simulaciones en pista y gradas



Ts (Tiempo central)

El tiempo central como medida de balance energético muestra ser mayor en las gradas que en la pista sobre todo en la zona de bajas y medias frecuencias. Lo cual indica que la reverberación es mayor en dicha área por debajo de los 1000 Hz. El recuadro sombreado muestra los valores recomendados de tiempo central, el cual debería ser bajo.

Los valores objetivos o representativos del tiempo central obtenidos son:

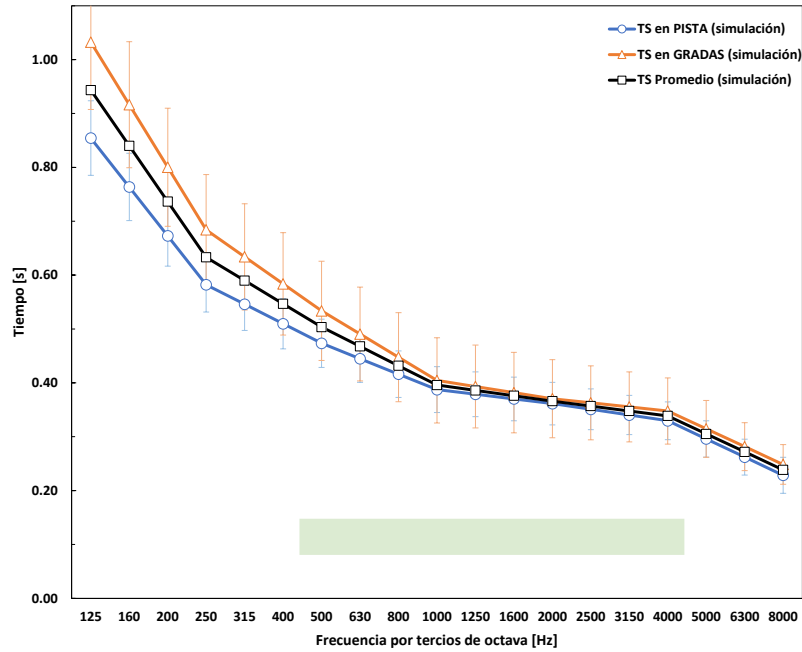
Tiempo central_(500-1000 Hz) en pista = 0.43 s

Tiempo central_(500-1000 Hz) en gradas = 0.469 s

Tiempo central_(500-1000 Hz) general = 0.45 s

Figura 68

TS Resultados de simulaciones en pista y gradas



ITDG (Intimididad)

En la simulación, los valores obtenidos de intimididad son igualmente que en la medición mayores a 20 ms. La intimididad parece mejorar en las gradas. Esto es, debido a la proximidad con la cúpula. El micrófono 14 registra una intimididad más favorable. Este valor se debe al reflejo causado por la lona ya que este micrófono se encuentra muy cerca de ella.

Tabla 14

Valores de ITDG obtenidos de la simulación

Micrófono	ITDG	Micrófono	ITDG
1	132.5 ms	9	109.28 ms
2	132.5 ms	10	109.28 ms
3	109 ms	11	x
4	131.25 ms	12	94.49 ms
5	127.77 ms	13	99.67 ms
6	125.48 ms	14	39.5 ms
7	119.09 ms	15	96.23 ms
8	-94.53 ms	16	96.23 ms

Comparación de resultados entre cálculos, mediciones y simulaciones.

Análisis de rayos

A continuación se muestran las reflexiones de los micrófonos 3 y 15 generadas en la simulación. En orden descendente en la parte superior se muestra el análisis gráfico de rayos, en seguida la curva ETC obtenida de la simulación y finalmente la curva ETC obtenida de la medición. Las simulaciones se realizaron con el software Rhinoceros y el plugin Pachyderm. El ecograma de la medición se obtuvo mediante la generación un código en MatLab. Los archivos de audio que se muestran en este análisis corresponden a las grabaciones de la claqueta. Se excluyen de este análisis los micrófonos 2, 8, 10, 11 y 16.

Figura 69

Análisis de reflejos del micrófono 3 (simulación y medición)

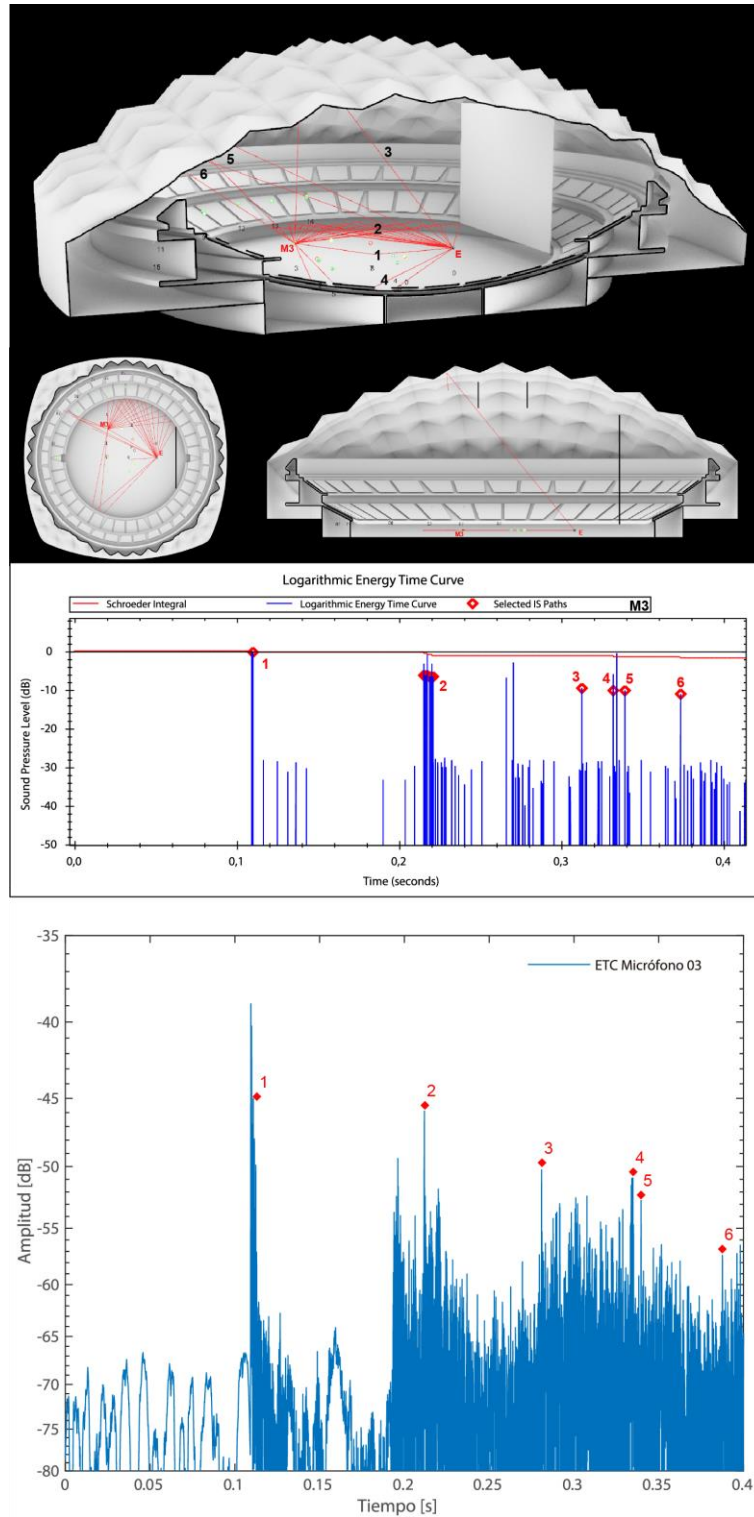
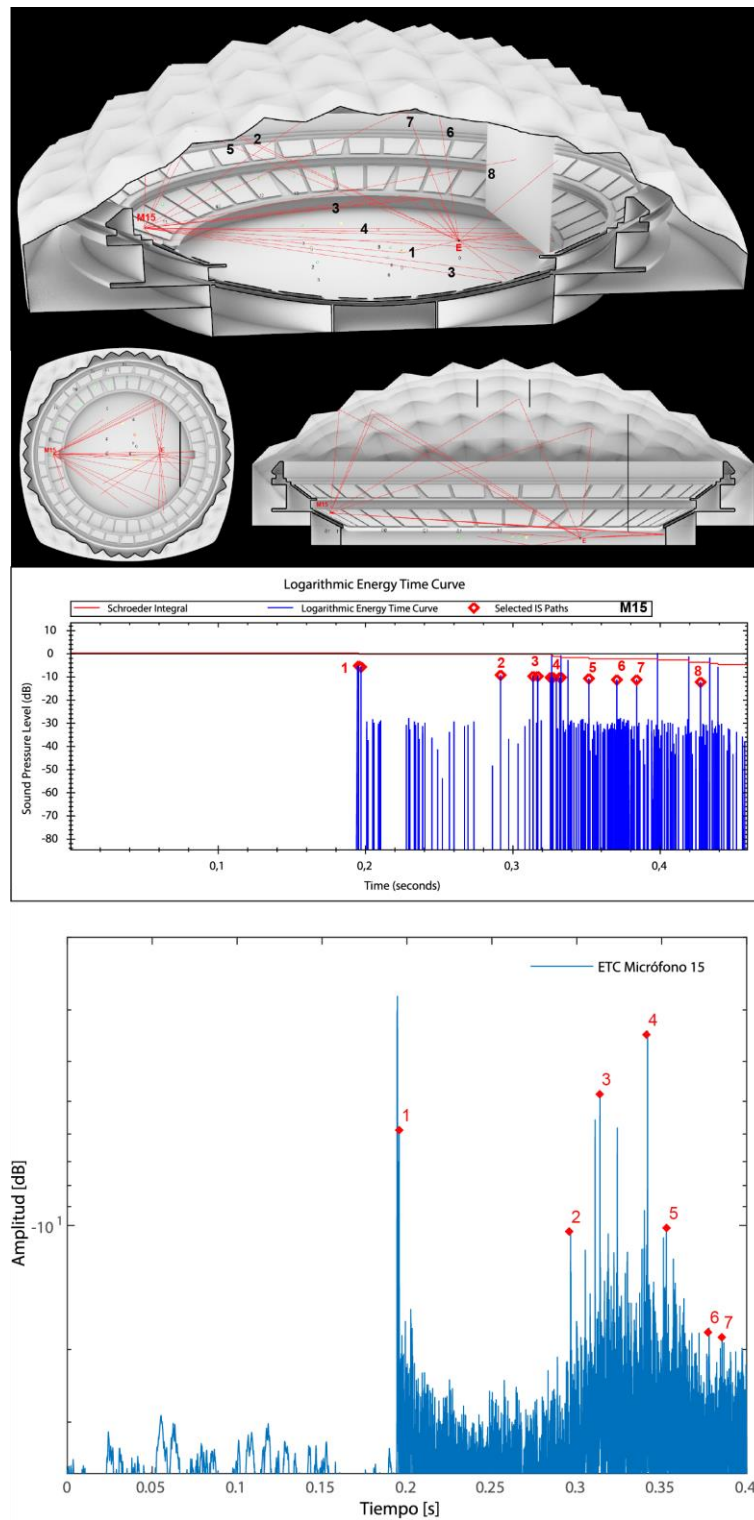


Figura 70

Análisis de reflejos del micrófono 15 (simulación y medición)



En las tablas 15 y 16 se muestra la información de las reflexiones de primer orden. El reflejo 0 corresponde al sonido directo. La diferencia de tiempo corresponde al tiempo transcurrido entre la llegada del sonido directo al micrófono y la llegada del sonido proveniente de cada reflejo. Por último, la diferencia de nivel muestra el decaimiento de intensidad de cada reflexión con respecto a la del sonido directo. Esta información es útil para poder saber cuáles reflexiones se consideran “ecos molestos” de acuerdo al criterio de Barron antes mencionado.

Tabla 15

Análisis de reflejos por micrófono en pista

Análisis de reflejos en la pista						
Mic.	Reflejo	Simulación		Medición		Origen
		Diferencia de tiempo [ms]	Diferencia de nivel [dB]	Diferencia de tiempo [ms]	Diferencia de nivel [dB]	
1	0	0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.5	0	1.5	-10	Piso
	2	132.5	-7	137.5	-14	Muro perimetral, parte frontal
	3	180.5	-9	174.5	-13	Muro perimetral, parte posterior
	4	202.5	-10	215.5	-12	Cúpula, parte alta
3	0	0.0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	0.9	0	1.0	-6	Piso
	2	108.9	-6	102.0	-6	Muro perimetral, parte izquierda
	3	200.9	-9	171.0	-11	Cúpula, parte alta
	4	220.9	-10	225.0	-11	Muro perimetral, parte derecha
	5	230.9	-10	230.0	-13	Cúpula, parte baja
	6	260.9	-11	278.0	-18	Cúpula, parte baja
4	0	0.0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	0.3	0	1.0	-1	Piso
	2	131.3	-11	139.3	-23	Muro perimetral, parte frontal
	3	210.3	-15	218.3	-7	Cúpula, parte alta
	4	265.3	-16	264.3	-20	Cúpula, parte alta
	5	276.3	-17	277.3	-21	Cúpula, parte media
	6	294.3	-17	294.3	-25	Cúpula, parte media
5	0	0.0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	0.8	0	0.8	-3	Piso
	2	127.8	-7	110.8	-6	Muro perimetral, parte frontal
	3	142.8	-8	139.8	-6	Muro perimetral, parte derecha
	4	200.8	-10	180.8	-8	Muro perimetral, parte izquierda
	5	245.8	-11	247.8	-15	Cúpula, parte media
6	0	0.0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	0.5	0	0.5	-5	Piso
	2	125.5	-10	131.5	-8	Muro perimetral, parte frontal
	3	249.5	-14	211.5	-7	Cúpula, parte alta
	4	266.5	-15	252.5	-14	Muro perimetral, parte posterior
	5	273.5	-15	260.5	-15	Cúpula, parte alta
7	0	0.0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.1	0	1.1	-3.7	Piso
	2	119.1	-10	106.1	-9	Muro perimetral, parte frontal
	3	200.1	-13	191.1	-3	Cúpula, parte alta
	4	225.1	-14	238.1	-12	Cúpula, parte alta
	5	252.1	-14	258.1	-18	Cúpula, parte alta
	6	279.1	-15	280.1	-21	Muro perimetral, parte posterior
	7	286.1	-15	290.1	-21	Cúpula, parte baja

Tabla 16

Análisis de reflejos por micrófonos en gradas

Análisis de reflejos en la gradas						
Mic.	Reflejo	Simulación		Medición		Origen
		Diferencia de tiempo [ms]	Diferencia de nivel [dB]	Diferencia de tiempo [ms]	Diferencia de nivel [dB]	
9	0	0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.3	-3	1.3	-3	Piso de pista y gradas
	2	109.3	-7	101.3	-13	Cúpula, parte baja
	3	142.3	-8	135.3	-15	Cúpula, parte alta
	4	179.3	-9	190.3	-15	Muro perimetral de gradas
12	0	0.0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.5	-5	1.5	-3	Piso de pista y gradas
	2	94.5	-9	88.5	-16	Cúpula, parte media
	3	103.5	-9	108.5	-8	Cúpula, parte baja
	4	134.5	-10	134.5	-10	Cúpula, parte alta
	5	162.5	-10	162.5	-9	Cúpula, parte alta
13	0	0.0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.7	-2.8	1.7	-2	Piso de pista y gradas
	2	99.7	-7	99.7	-22	Cúpula, parte baja
	3	108.7	-7.4	111.7	-8	Cúpula, parte media
	4	224.7	-10	220.7	-16	Muro perimetral de gradas
14	0	0.0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	0.5	0	1.0	-6	Piso de pista y gradas
	2	39.5	-6	43.0	-17	Lona
	3	107.5	-6	109.0	-9	Cúpula, parte alta
	4	114.5	-7	115.0	-11	Cúpula, parte alta
15	0	0.0	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.2	-5	1.2	-3	Piso de pista y gradas
	2	96.2	-9	101.2	-7	Cúpula, parte baja
	3	122.2	-10	118.2	-2	Muro perimetral de gradas
	4	135.2	-10	139.2	-1	Muro perimetral, parte frontal
	5	156.2	-10	157.2	-7	Cúpula, parte media
	6	176.2	-11	182.2	-14	Cúpula, parte media
7	189.2	-11	190.2	-15	Cúpula, parte media	

Los micrófonos ubicados en la pista (del micrófono 1 al 7) revelan que el tiempo de llegada del segundo reflejo con respecto al sonido directo es en la mayoría de los casos después de 120 ms con intensidades entre -6 dB y -10 dB. Estos reflejos provienen del muro perimetral de la pista.

En segundo lugar llegan las reflexiones provenientes de la parte alta de la cúpula y por último una combinación entre muro y cúpula. Los micrófonos ubicados en las gradas (del micrófono 9 al 15) muestran tiempos de llegada del segundo reflejo entre 80 ms y 110 ms con el caso excepcional del micrófono 14 que presenta un reflejo de la lona a los 43 ms. La mayoría de las intensidades registradas son de -7 dB con respecto al sonido directo. Estas segundas reflexiones provienen de la parte baja de la cúpula, posteriormente de la parte media combinada con las gradas y por último de la parte alta de la cúpula.

De acuerdo al criterio de Barron (ver figura 25), los ecos molestos comienzan a partir de los 50 ms después del sonido directo con una diferencia de intensidad desde 0 dB hasta -15 dB para 100 ms. Por lo tanto, en el caso de la pista y las gradas del Palacio de los Deportes de la Ciudad de México se puede concluir que prácticamente todos los reflejos a excepción de los que provienen del piso son ecos molestos que demeritan el desempeño acústico.

Parámetros acústicos

Como se ha observado en los capítulos anteriores, se reportan diferencias notables entre cálculos, simulaciones y mediciones. Las mediciones muestran valores menores a la simulación y a los cálculos de tiempo de reverberación. Los tres métodos se realizaron con los mismos coeficientes de absorción de materiales, de aire y mismos parámetros atmosféricos. Por lo anterior, para las siguientes comparaciones se realizó una calibración de los cálculos y la simulación con respecto a las mediciones. Esto es, los valores promedio de tiempo de reverberación de las mediciones en la banda de 1 kHz se divide entre los valores promedio de tiempo de reverberación de la simulación y los cálculos en la banda de 1 kHz obteniendo así un

factor de escala (FE). Este valor se multiplica por los valores de tiempo de reverberación de las demás bandas de frecuencia en la simulación y en los cálculos.

Figura 71

Comparación de EDT (simulación y medición). FE=0.63

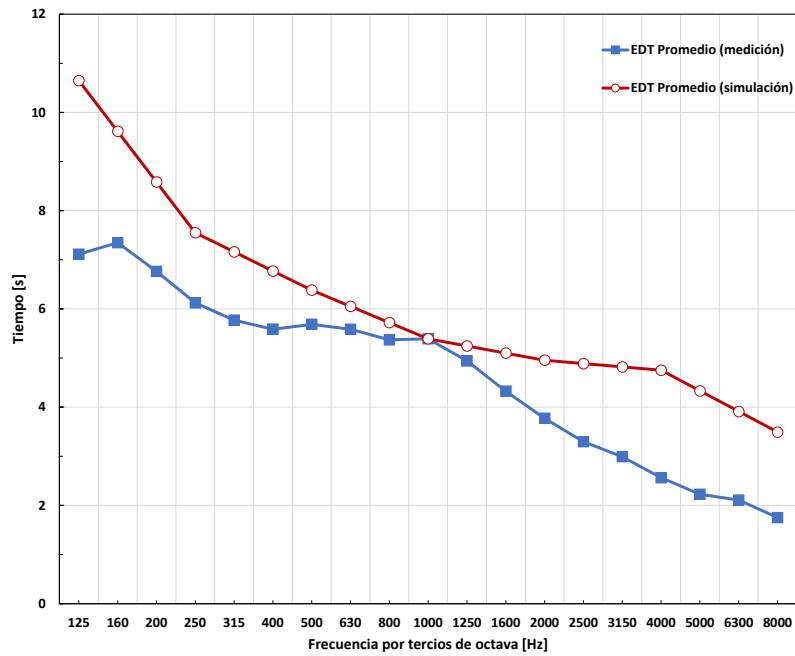


Figura 72

Comparación de T20 (simulación y medición). FE=0.59

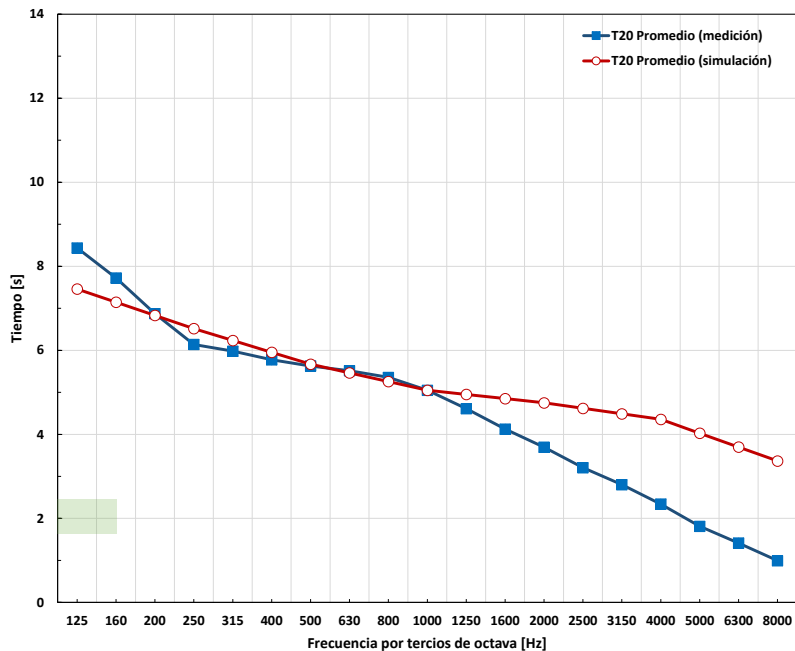


Figura 73

Comparación entre T30 promedio en pista de las mediciones y promedio general de la simulación

FE=0.72

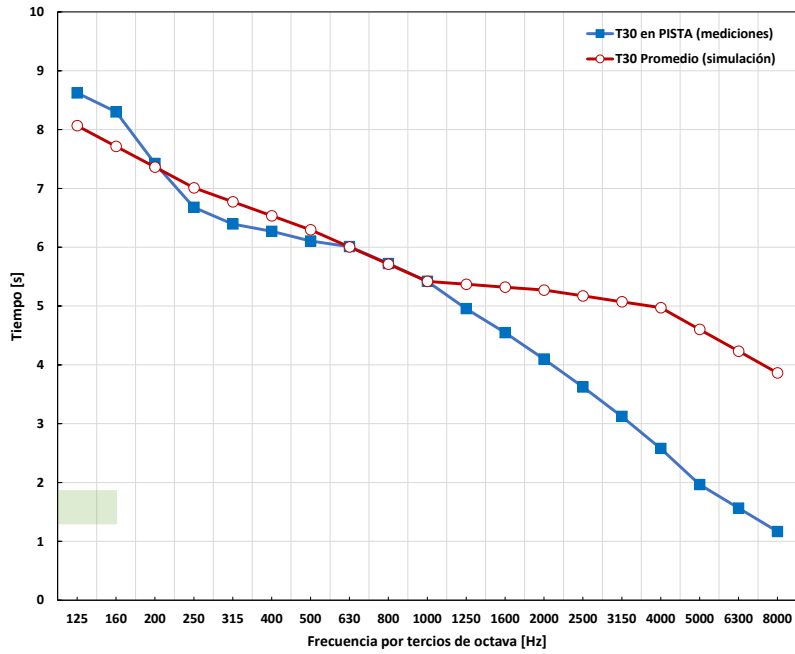


Figura 74

Comparación de C50 (simulación y medición). FE=0.157

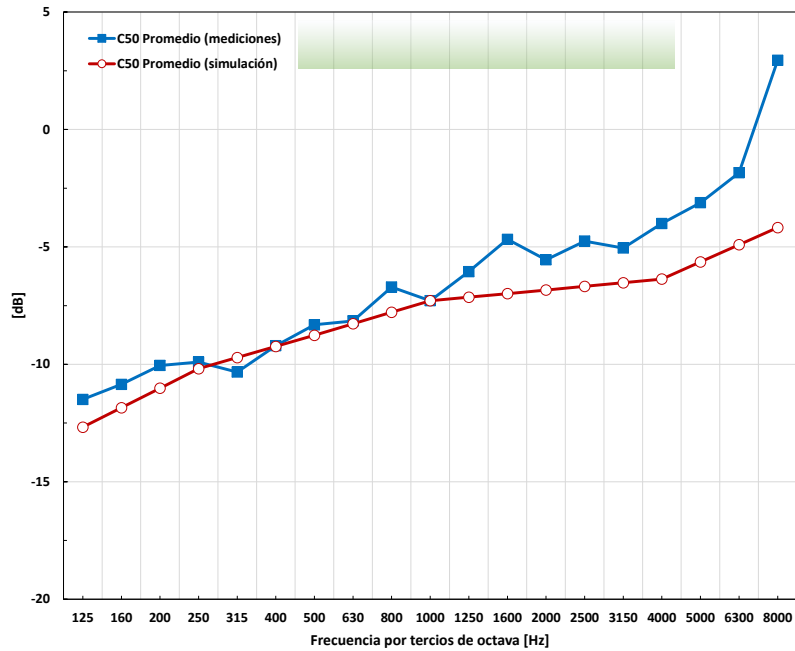


Figura 75

Comparación de C80 (simulación y medición). FE=1.18

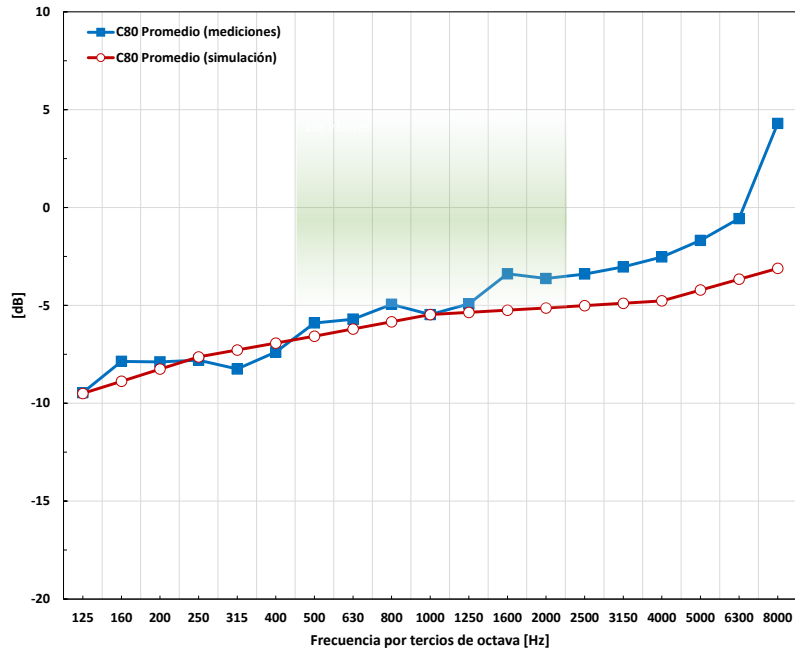


Figura 76

Comparación de D50 (simulación y medición). FE=0.74

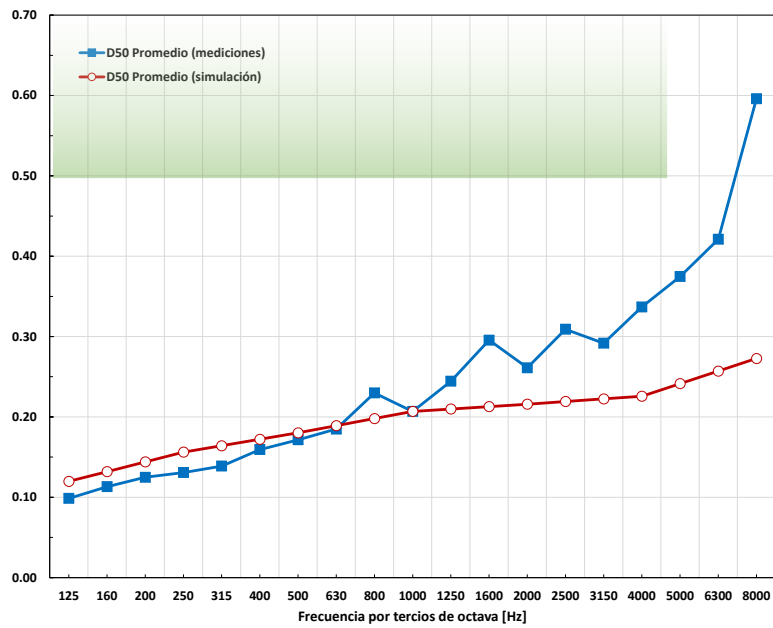


Figura 77

Diferencias de TS (simulación y medición). FE=0.94

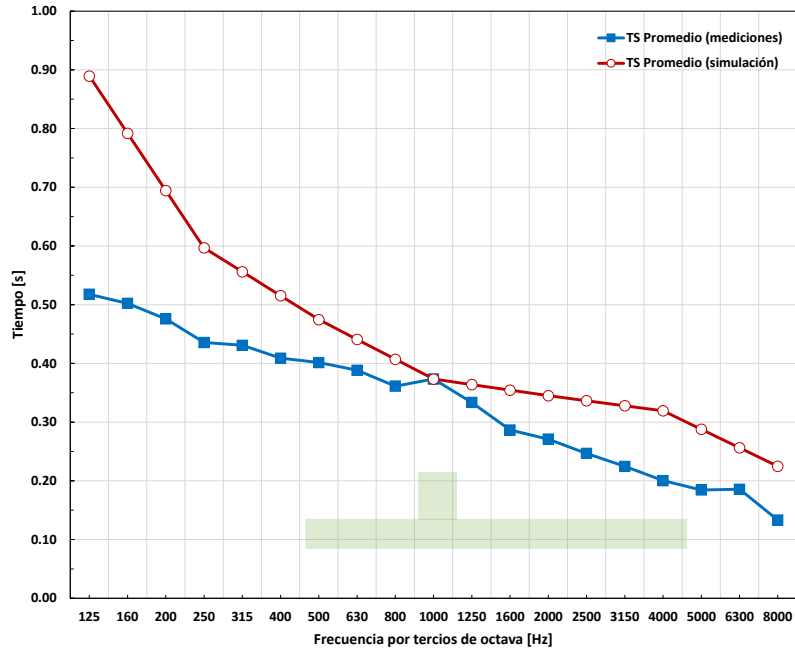


Figura 78

Tiempo de reverberación, valores objetivos (cálculos, simulación y medición)

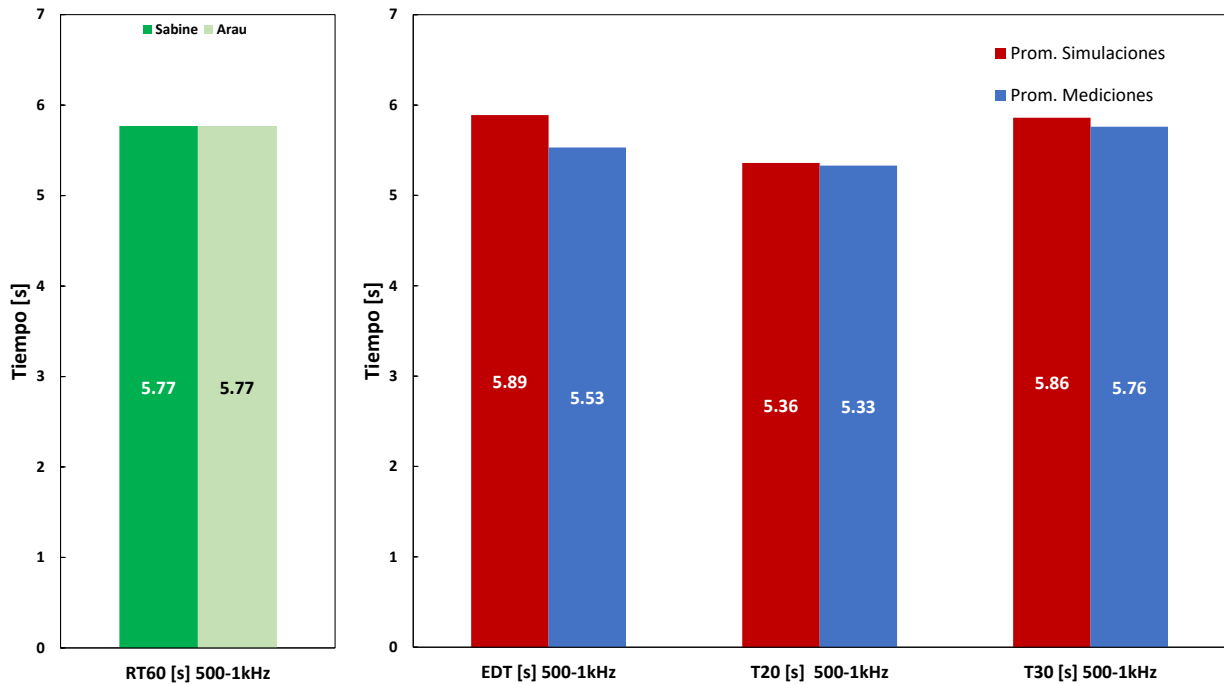


Figura 79

Claridad, definición y tiempo centra, valores objetivos (simulación y medición)

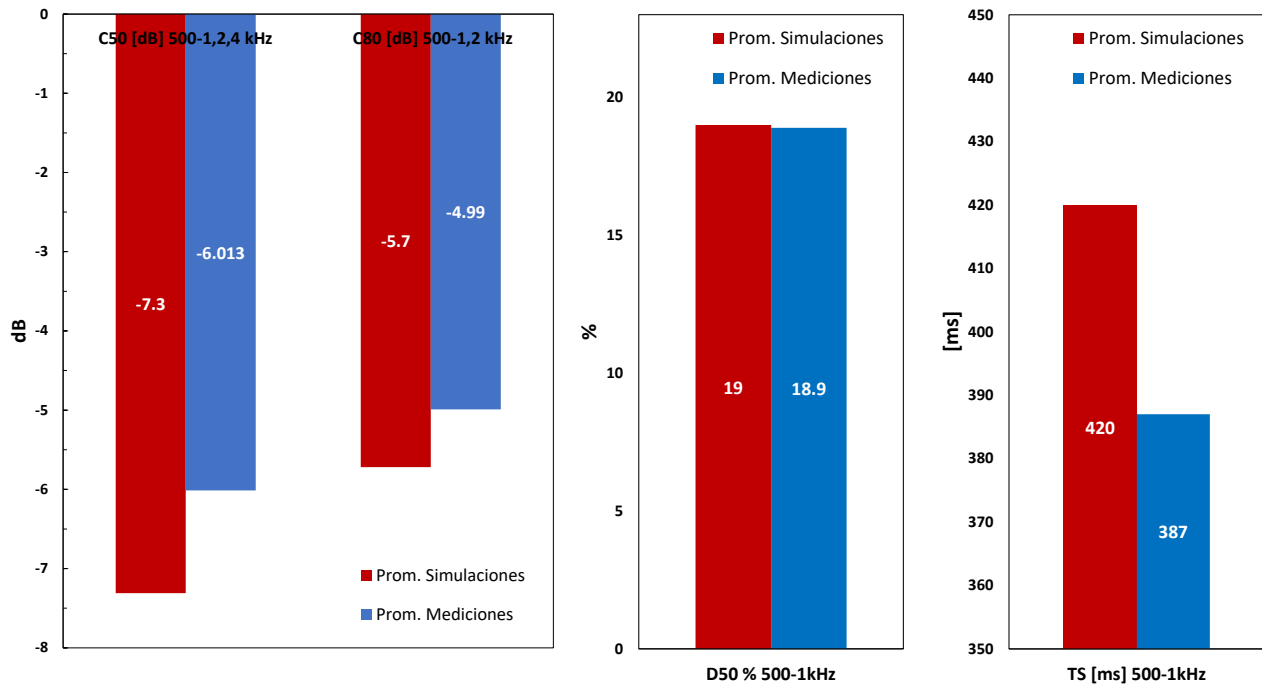


Figura 80

Porcentaje de inteligibilidad (mediante cuestionario)

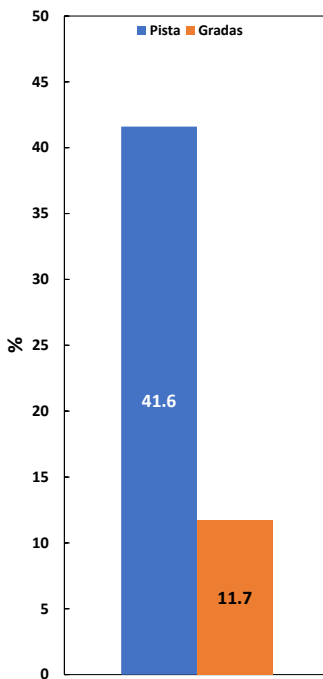


Tabla 17

Promedios de medición y simulación (calibrada) de parámetros acústicos (valores objetivos)

	EDT [s] 500-1kHz	T20 [s] 500-1kHz	EDT/T20 500-1kHz	T30 [s] 500-1kHz	EDT/T30 500-1kHz	C50 [dB] 500-1,2,4 kHz	C80 [dB] 500-1,2 kHz	D50 % 500-1kHz	TS [ms] 500-1kHz	Intelligibility Score [%]
Medición	5.53	5.33	1.03	5.76	0.87	-6.013	-4.99	18.9	387	26.65
Simulación	5.89	5.36	1.10	5.86	1.01	-7.31	-5.72	19.00	420.00	

Esta diferencia entre simulación y medición real es posiblemente debido a los coeficientes de absorción usados. Los cuales fueron elegidos en la literatura existente de los materiales más parecidos a los que en realidad se encuentran en el recinto.

En este apartado de parámetros acústicos podemos concluir que el tiempo de reverberación es mucho mayor al recomendado por diferentes autores. Este tiempo de reverberación es mayor en bajas y medias frecuencias, característica de un recinto “opaco” en términos acústicos. En consecuencia, demerita la claridad, definición y la inteligibilidad en el recinto. Aunque el desempeño acústico es mejor en la pista que en las gradas, este no es recomendable para eventos musicales. Las diferencias entre mediciones y simulaciones son aceptables al tratarse de un recinto de tales dimensiones, en promedio de los parámetros de tiempo es de 4.5 segundos. Por lo anterior, ambos métodos quedan validados entre ellos.

Comparación de parámetros acústicos con otros recintos similares

El Palacio de los Deportes de la Ciudad de México es un edificio único en su categoría. Por un lado tiene un gran volumen y puede albergar a un gran número de personas. Lo que lo hace poco común es que es un recinto cerrado con un domo de madera y cobre. Agregando otra característica que lo hace diferente de los demás es el domo en forma de cúpula y su gradería circular. El último detalle que lo hace único es que fue diseñado por el arquitecto Félix Candela. Por lo tanto si nos enfocamos en sus características arquitectónicas encontramos dos edificios similares. Ya sea por su aforo o por su volumen, el O2 Arena London y el Men Arena de Manchester son edificios muy similares al Palacio de los Deportes de la Ciudad de México. Además los tres cuentan con un domo que cubre la totalidad de las gradas.

Niels Werner nos comparte en su libro (Adelman-Larsen, 2014, p. 476) algunos parámetros acústicos de estos dos recintos. Gracias a ello podemos compararlos con los parámetros de esta investigación. Estos dos recintos cuentan con una buena calificación subjetiva por parte del público. Por lo tanto, se pueden tomar como referencia para lograr un buen desempeño acústico.

Tabla 18

Parámetros acústicos de referencia

	Volumen [m ³]	Capacidad [Personas]	EDT [s] 125-2kHz	T30 [s] 125-2kHz	C80 [dB] 125-2kHz
Palacio de los Deportes	444,194	22,000	5.67	5.76	-6.35
O2 Arena London	400,000	20,000	1.83	2.17	-2.69
Men Arena Manchester	250,000	21,000	2.22	2.47	-0.4

Figura 81

Comparación de volumen y aforo

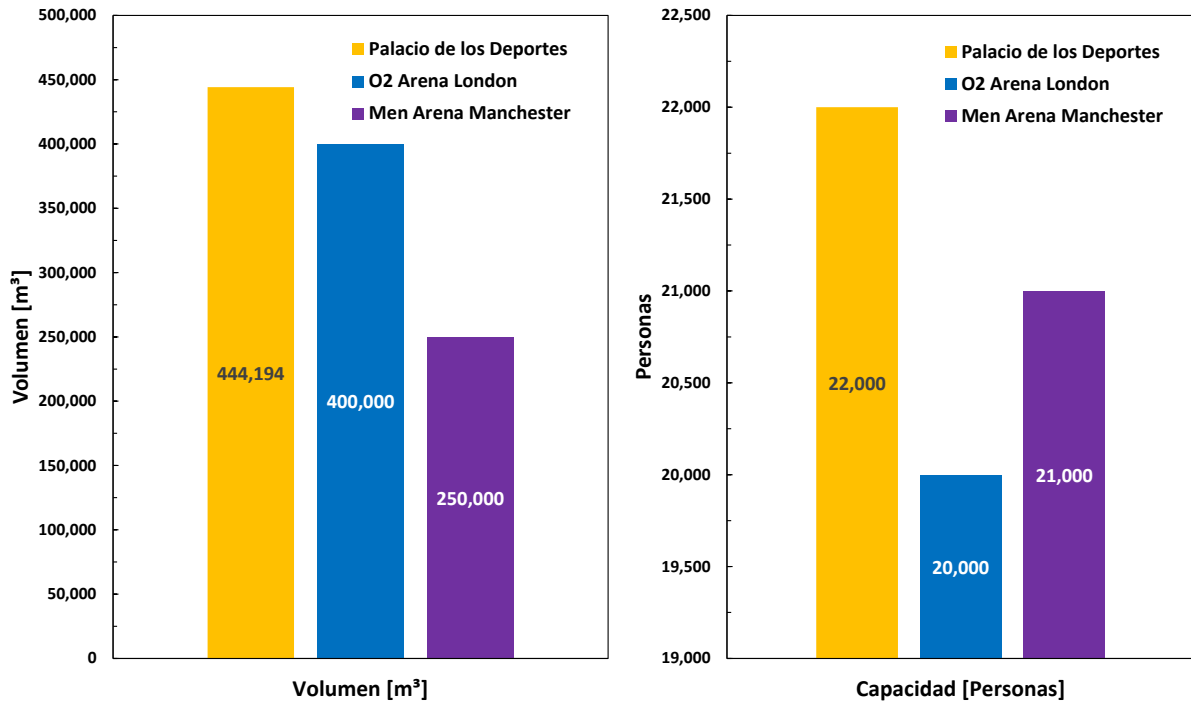


Figura 82

Comparación de tiempo de reverberación

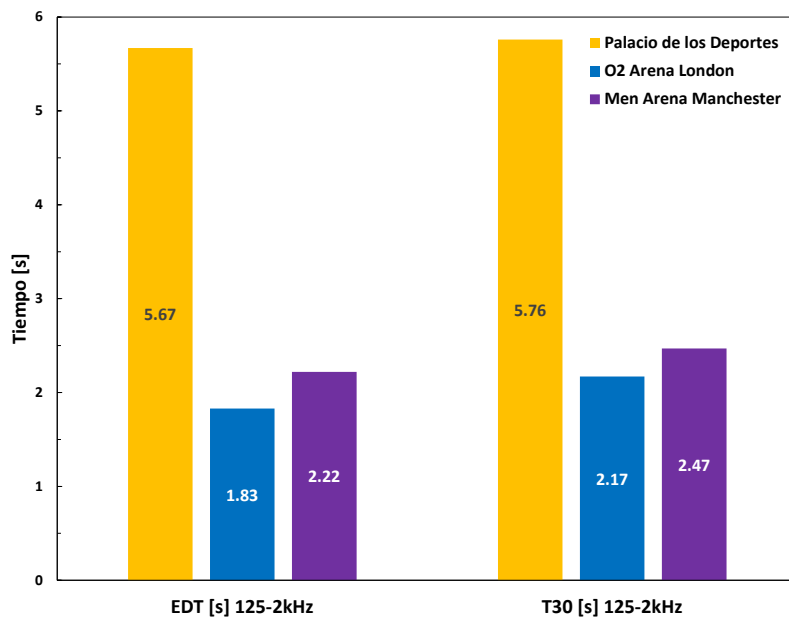
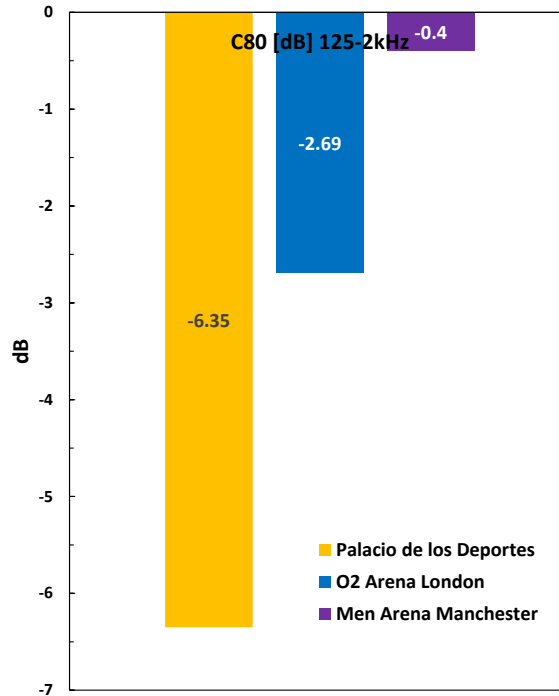


Figura 83

Comparación de C80



Las gráficas muestran que el Palacio de los Deportes de la Ciudad de México tiene más del doble de los valores de los otros dos recintos. Los valores de parámetros acústicos del Palacio de los Deportes reportados en estas gráficas son los obtenidos de las mediciones. Es decir, los valores más bajos obtenidos como se mostró en el apartado anterior. Como conclusión de esta comparación con recintos similares y con buen desempeño acústico se confirma que el Palacio de los Deportes tiene más del doble del tiempo de reverberación esperado para un recinto de su volumen y como consecuencia una claridad musical escasa.

Recomendaciones de acondicionamiento acústico

De acuerdo al diagnóstico acústico del Palacio de los Deportes, los objetivos a tratar para que los parámetros acústicos se encuentren dentro de los valores recomendados por diferentes autores son el tiempo de reverberación y los ecos molestos. Además, se tiene la incorrecta configuración del sistema sonoro. Es decir, la selección del equipo de sonido adecuado, la ubicación de sus altavoces o line arrays, su calibración de nivel de presión sonora, ecualización, etc. Esta configuración del equipo de sonido es variable ya que depende de cada artista y su equipo técnico. Por lo cual queda fuera de los alcances de esta investigación al no formar parte de la arquitectura del lugar.

A continuación, se presentan algunas propuestas acústicas para que el Palacio de los Deportes se encuentre dentro de los valores acústicos recomendados. Es importante señalar que para estas propuestas no se realizaron análisis estructurales ni tampoco una inspección en las instalaciones del recinto para determinar si se encuentran en condiciones óptimas de mantenimiento para soportar el peso de las propuestas descritas.

Difusores acústicos.

Con el objetivo de evitar focalizaciones y ecos molestos se emplean difusores acústicos. Estos elementos dispersan el sonido uniformemente cuando la onda sonora incide sobre su superficie. Numerosas salas de conciertos en el mundo hacen uso de esta técnica de difusión ubicándolos en diferentes partes de la sala. Generalmente se colocan en donde los reflejos de sonido son muy notables, por ejemplo, en los muros y en el plafón.

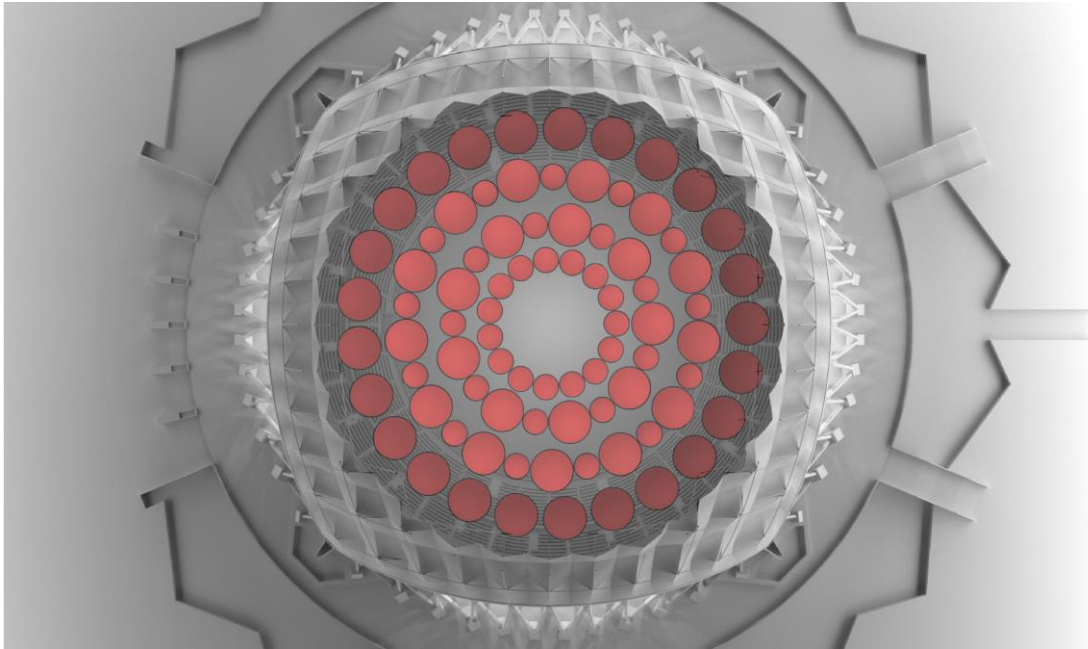
En la ciudad de Londres se encuentra una sala de conciertos llamada “Royal Albert Hall”. Este recinto tiene la particularidad arquitectónica de poseer un domo en forma de cúpula. Se inauguró en el año de 1871 con un discurso del Príncipe de Gales en el cual las palabras se escuchaban repetidas debido a los ecos y focalizaciones creadas por la cúpula (Metkemeijer et al., 2002, p. 1). Desde entonces se han realizado múltiples estrategias para mejorar la calidad acústica de ese lugar. Fue hasta el año de 1968 cuando se colocaron finalmente difusores acústicos colgando debajo de la cúpula. Estos difusores llamados localmente “mushrooms” por su forma circular convexa lograron mejorar la calidad acústica. Posteriormente se experimentó colocando los difusores en diferentes arreglos o posiciones llegando finalmente a la que se puede observar en la actualidad.

En esta investigación se realizaron simulaciones con diferentes tipos de plafón cubriendo la pista y parte de las gradas. La desventaja fue que la difusión no es uniforme para una gradería circular. Además, la ubicación del escenario quedaba limitada a estar siempre en un extremo de las gradas. El Palacio de los Deportes es un recinto multifuncional con dos configuraciones de escenario, el cual puede estar en un extremo o en el centro de la pista. Estas configuraciones de escenario dependen del artista que se presente en el recinto. Por tal motivo, se realizaron simulaciones tomando como ejemplo el caso del Royal Albert Hall. Esto es, colocando difusores circulares convexos colgados del domo que parten desde el centro de la pista hasta los extremos de la gradería. En consecuencia, los resultados de la simulación mostraron una mejor dispersión del sonido hacia el área del público. Los reflejos no solo son dispersados, sino que también acortan las distancias y el tiempo entre el sonido directo y el reflejado. Lo anterior ayudará a disminuir notablemente los ecos molestos recorriendo los reflejos hacia el área de ecos deseables

en la gráfica de Barron. La mayor parte de los reflejos de las ondas de sonido que llegan a atravesar la capa de difusores quedan atrapados en la parte cóncava de los mismos.

Figura 84

Disposición de difusores acústicos



Tiempo de reverberación optimizado

De acuerdo a la investigación de Niels Werner el tiempo de reverberación recomendado para un recinto del volumen del Palacio de los Deportes está entre dos y tres segundos. Lo cual se puede comprobar en el MEN Arena Manchester con un T30 promedio de 2.17 s en las bandas de 125 Hz a 2 kHz y en el O2 Arena London con un T30 promedio de 2.47 s en las bandas de frecuencia de 125 Hz a 2 kHz.

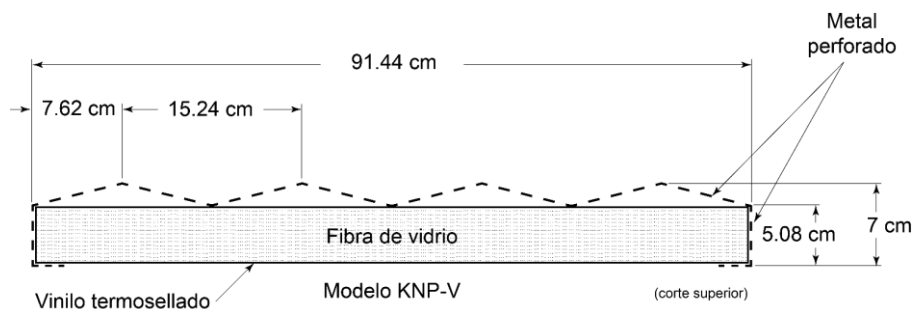
Para lograr tal objetivo, se realizaron simulaciones con diferentes arreglos colocando materiales de diferentes coeficientes de absorción acústica en diferentes zonas. Los arreglos se denominan de la siguiente manera:

Arreglo A: sin tratamiento acústico propuesto, es decir, las condiciones en las que se midió el Palacio de los Deportes con el propósito de tomarlo como referencia.

Arreglo B: En el muro perimetral de la pista se colocan una serie de paneles absorbentes. Estos paneles constan de una lámina de lámina de acero galvanizado calibre 22 con perforaciones circulares que cubre un bloque de fibra de vidrio envuelta en una bolsa de vinilo negro termosellada. La lámina de acero se encuentra en forma de zig-zag. Las dimensiones de cada panel son 0.914 m de ancho y 3.048 m de alto por 7 cm de grosor. Para cubrir la circunferencia del muro perimetral de la pista se necesitarán alrededor de 297 paneles sin descontar los espacios del muro donde se encuentran los accesos a la pista. En esta simulación se seleccionó el panel de la marca Kinetics modelo KNP-V. El fabricante ofrece variedad de colores y medidas así como la opción de que la forma de la lámina sea plana o en zig-zag.

Figura 85

Panel absorbente

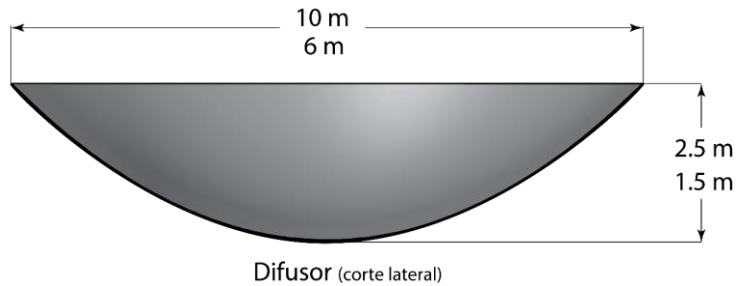


Arreglo C: Este arreglo consiste en conservar el arreglo B además de la colocación de baffles absorbentes al sonido suspendidos a manera de “banderines” en el área del domo. Los baffles se conforman de fibra de vidrio de 48 kg/m^3 encapsulada en una bolsa de vinilo termosellada y retardante de fuego. Los baffles tienen un largo de 2.4 m por un ancho de 1.2 m y un grosor de 5 cm. Cada banderín consta de cuatro baffles, de manera que las dimensiones de cada banderín son de 2.4 m de ancho por 4.8 m de largo. De acuerdo a la simulación se emplea un total de 500 banderines, es decir 2,000 baffles obteniendo un peso total de alrededor de 13,840 kg.

Arreglo D: El arreglo D se compone de 47 difusores convexos de 10 m de diámetro y 37 difusores convexos de 6 m de diámetro como se muestra en la figura 86 además del tratamiento acústico descrito en el arreglo B. Los difusores están hechos de lámina de fibra de vidrio de 2.3 mm de espesor y dentro de ellos (en su parte cóncava) contienen placas de lana mineral. Los difusores de 10 m de diámetro tienen un área de 95.39 m^2 , en la cual se colocan 130 placas de lana mineral de 1.22 m de largo por 0.61 m de ancho y 10 cm de espesor. Los difusores de 6 m de diámetro tienen un área de 34.35 m^2 , donde se ubican 47 placas de lana mineral del mismo tipo. Todo el sistema de 84 difusores con lana mineral tiene un peso de 4,603 kg. En la simulación se optó por colocar el material de los difusores como triplay de 9.5 mm al no haber coeficientes de absorción acústica de láminas de fibra de vidrio en la literatura existente. La ubicación de los difusores Los difusores se colocan de manera circular cubriendo 360° con el centro de la pista como origen. Consta de cuatro grupos o anillos de difusores en donde cada anillo tiene una altura diferente. Partiendo del centro, el primer anillo tiene una altura de la pista a punta de los difusores de 18.8 m, el segundo anillo tiene una altura de 20.2 m, el tercer anillo una altura de 22 m y finalmente el cuarto anillo con una altura de 24 m.

Figura 86

Corte lateral del difusor



Arreglo E: Consiste en la colocación de placas de espuma de poliuretano en la totalidad del área interna del domo la cual es aproximadamente de 19,575.39 m². Estas placas tienen una densidad de 70 kg/m³, 0.6 m de ancho, 1.2 m de largo y un espesor de 5 cm. Por lo cual, se necesitan aproximadamente 27,188 piezas en la cara interna del domo generando un peso de 68,513.76 kg. De igual manera que en los arreglos anteriores, se complementa con el arreglo B.

Arreglo F: Se combinan los arreglos B, C y D, es decir, se compone de paneles perforados en el muro perimetral, banderines y difusores suspendidos del domo. Lo cual genera una carga de 18,441.82 kg.

Arreglo G: Consiste en la combinación de todos los arreglos anteriores con un peso total de 86,955.58 kg

Tabla 19

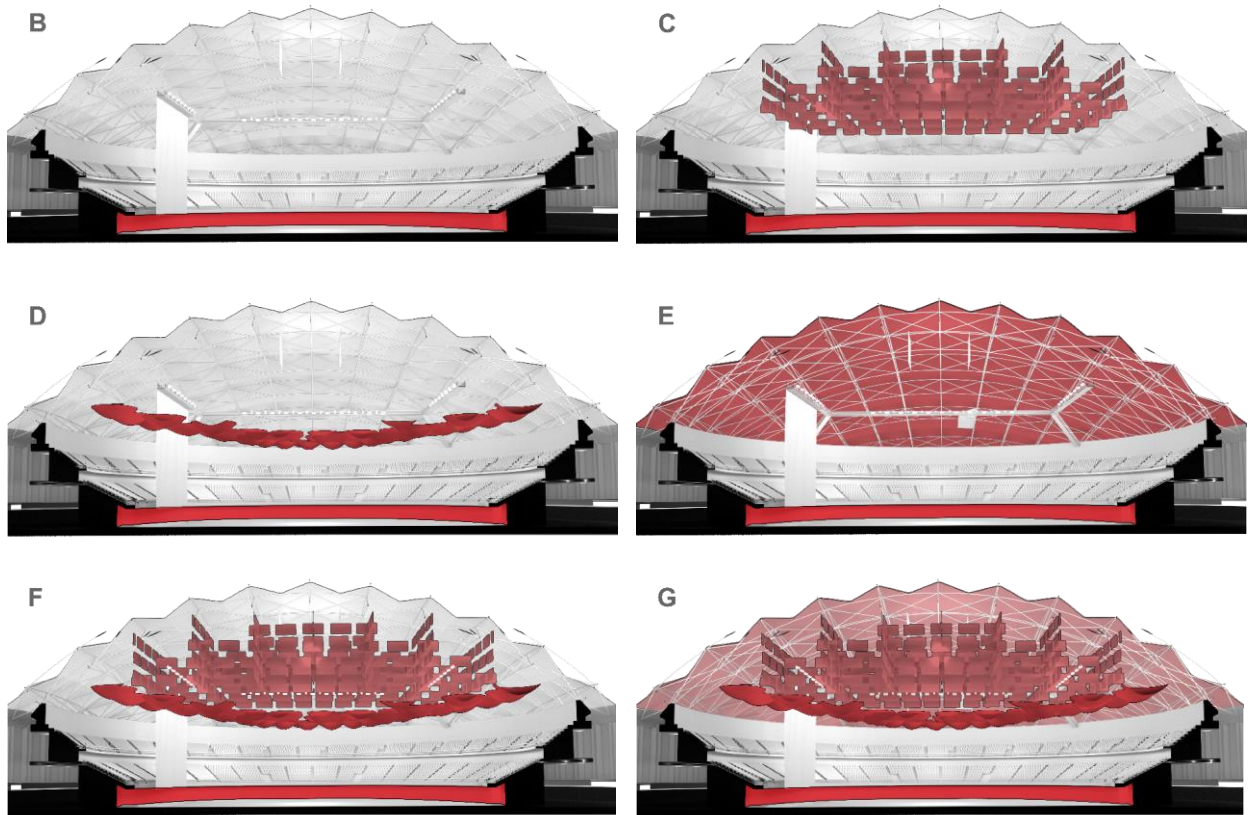
Coefficientes de absorción acústica en materiales propuestos

MATERIAL	COEFICIENTES DE ABSORCIÓN POR BANDAS DE OCTAVA					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
* Panel perforado KNP-V (Kinetics)	0.22	0.77	1.12	1	0.78	0.57
** Baffle KB803 (Kinetics)	0.25	0.74	1.15	1.8	1.5	0.98
*** Espuma de Poliuretano 70 kg/m ³	0.16	0.82	1.08	0.97	0.95	0.98
**** Triplay de madera de 9.5 mm	0.28	0.22	0.17	0.09	0.1	0.11
***** Lana Mineral FF64-4"	1.03	1.06	1.13	1.04	1.07	1.08

Nota: Coeficientes de absorción obtenidos de: *(KNP | *Perforated Metal Acoustical Panels - Kinetics Noise Control | Manufacturer, s/f*), **(KB803 | *Noise Control Ceiling Baffles - Kinetics Noise Control | Manufacturer, s/f*), *****(Raichel, 2006, p. 250), *****(*Comercial | Fiberglass, s/f*)

Figura 87

Áreas evaluadas en la simulación



Nota: Arreglos B, C, D, E, F. Cada arreglo es una configuración diferente de áreas bajo evaluación. En cada arreglo se resaltan en color rojo las áreas evaluadas en la simulación.

El muro perimetral de la pista tratado con paneles KNP-V es la única constante que aparece en todas las configuraciones. Esto es debido a que los análisis de rayos realizados anteriormente revelan fuertes reflejos y focalizaciones en el área de la pista. El arreglo “A” no se muestra en la figura ya que son las condiciones iniciales en los que se realizó la medición, es decir, sin ningún área tratada acústicamente.

A continuación se muestran los valores de T20 obtenidos en las simulaciones comparados con el arreglo “A” el cual corresponde a los valores obtenidos en la medición.

Tabla 20

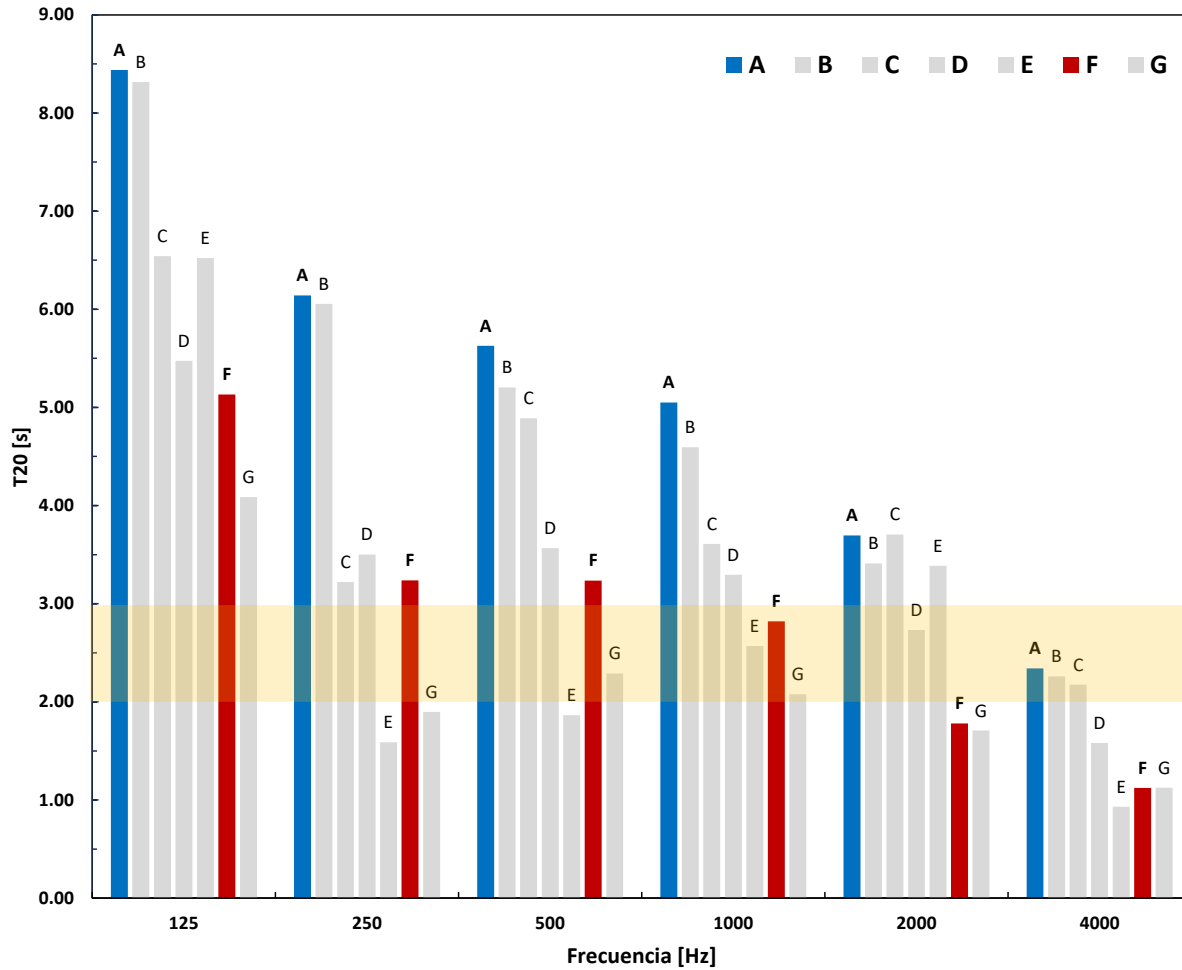
T20 de áreas tratadas acústicamente

Arreglo	Área de tratamiento acústico				T20 por octavas de frecuencia [s]						T20 Promedio (500 Hz - 1 kHz)
	Muro	Domo	Difusores	Banderines	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
	Pista										
A					8.44	6.14	5.63	5.05	3.70	2.34	5.34
B	●				8.32	6.05	5.20	4.60	3.41	2.26	4.90
C	●			●	6.54	3.22	4.89	3.61	3.71	2.18	4.25
D	●		●		5.48	3.50	3.57	3.30	2.73	1.58	3.43
E	●	●			6.52	1.59	1.86	2.57	3.39	0.93	2.22
F	●		●	●	5.13	3.24	3.24	2.82	1.78	1.12	3.03
G	●	●	●	●	4.09	1.90	2.29	2.08	1.71	1.13	2.18

En la figura 88 se grafican los valores de la tabla 20, el arreglo “A” se representa en la primera barra de color azul. La barra horizontal de color amarillo enmarca el intervalo deseable de valores para el tiempo de reverberación. Como se puede observar en la columna “T20 Promedio” los valores que se encuentran dentro de este intervalo son E, F y G. El arreglo E parece solucionar el tiempo de reverberación, sin embargo no soluciona el problema de los ecos molestos al no tener elementos difusores. El arreglo G que es la combinación de todos los anteriores tiene resuelto el problema de la reverberación y de los ecos molestos, sin embargo es probable que el peso sea excesivo. Lo anterior nos lleva al arreglo F, el cual también resuelve el tiempo de reverberación y los ecos molestos mediante los difusores. Por lo tanto, la solución final propuesta es el arreglo F.

Figura 88

T20 de los arreglos de tratamiento acústico



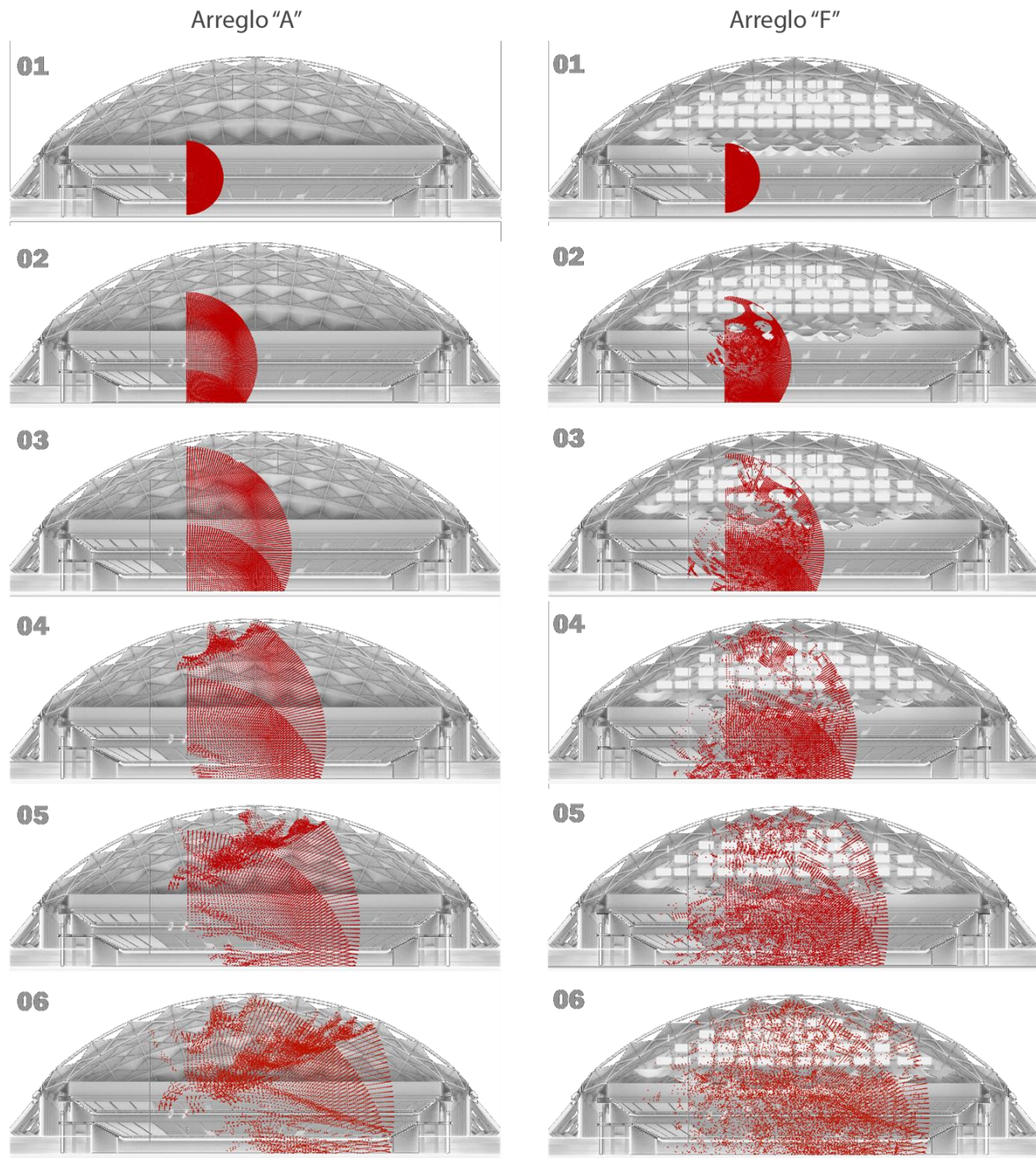
Nota: Barras azules corresponden a valores obtenidos en la medición (arreglo “A”). Los arreglos B, C, D, E, F y G corresponden a las simulaciones con tratamiento acústico en diferentes áreas. La zona sombreada corresponde a los valores deseables de T20.

Análisis de rayos.

En la figura 89 se presentan dos columnas de fotogramas correspondientes a una animación que describe el viaje de la onda sonora.

Figura 89

Animación de reflexiones acústicas con y sin difusores



La cantidad de rayos que logra atravesar la barrera de difusores se encuentra con la zona absorbente de banderines, disminuyendo la intensidad del sonido. Las ondas sonoras que llegan a la cúpula se reflejan hacia abajo encontrando de nuevo en su camino el tratamiento acústico. Las ondas sonoras que de primera instancia se reflejan con la parte convexa de los difusores se dispersan en diferentes direcciones evitando así las focalizaciones, además, estas ondas dispersas llegan al escucha con un tiempo más cercano al sonido directo, evitando así los ecos molestos.

En el siguiente análisis de rayos se busca obtener el ecograma derivado del tratamiento acústico (arreglo "F") para evaluar si aún existen ecos molestos según el criterio de Barron. A continuación se muestran dos ecogramas representativos de los 16 micrófonos empleados en la medición y en la simulación.

La figura 90 muestra el patrón de reflejos que recibe el micrófono 4 (M4) ubicado en la pista. El software arroja los resultados de los reflejos más significativos y que marca con puntos rojos. En la parte inferior de la imagen se presentan los ecogramas con tratamiento acústico y sin tratamiento acústico respectivamente. Como se puede observar, la mayoría de estos reflejos provienen del muro perimetral de la pista, sin embargo, llegan con una intensidad menor comparada con la misma área pero sin tratar acústicamente. Además, el ecograma muestra cómo se han eliminado en su mayoría los ecos molestos que provenían de la parte alta y media de la cúpula.

De igual manera, en la figura 91 se observa el patrón de reflejos que recibe el micrófono 12 (M12). Se observa cómo se han eliminado en su mayoría los reflejos no deseados o ecos

molestos que marca el software con puntos rojos. Los reflejos restantes que no se eliminan son provenientes de la zona de gradas.

En las tablas 21 y 22 se muestra el análisis de los reflejos que recibe cada micrófono empleado en la simulación. Es importante notar la diferencia de nivel que tiene el reflejo con respecto al sonido directo.

Figura 90

Análisis de reflejos del micrófono 4 (con tratamiento y sin tratamiento acústico)

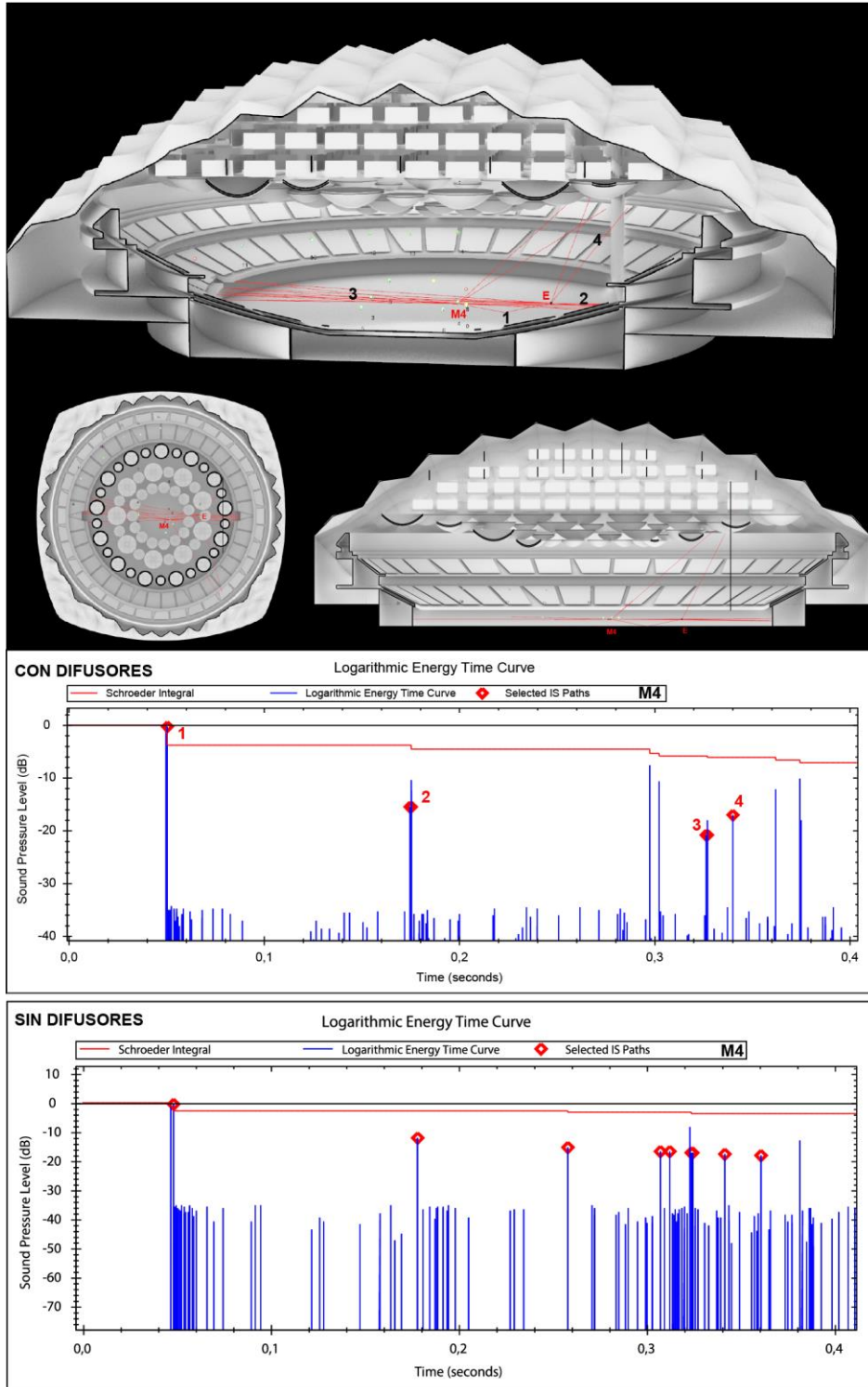


Figura 91

Análisis de reflejos del micrófono 12 (con tratamiento y sin tratamiento acústico)

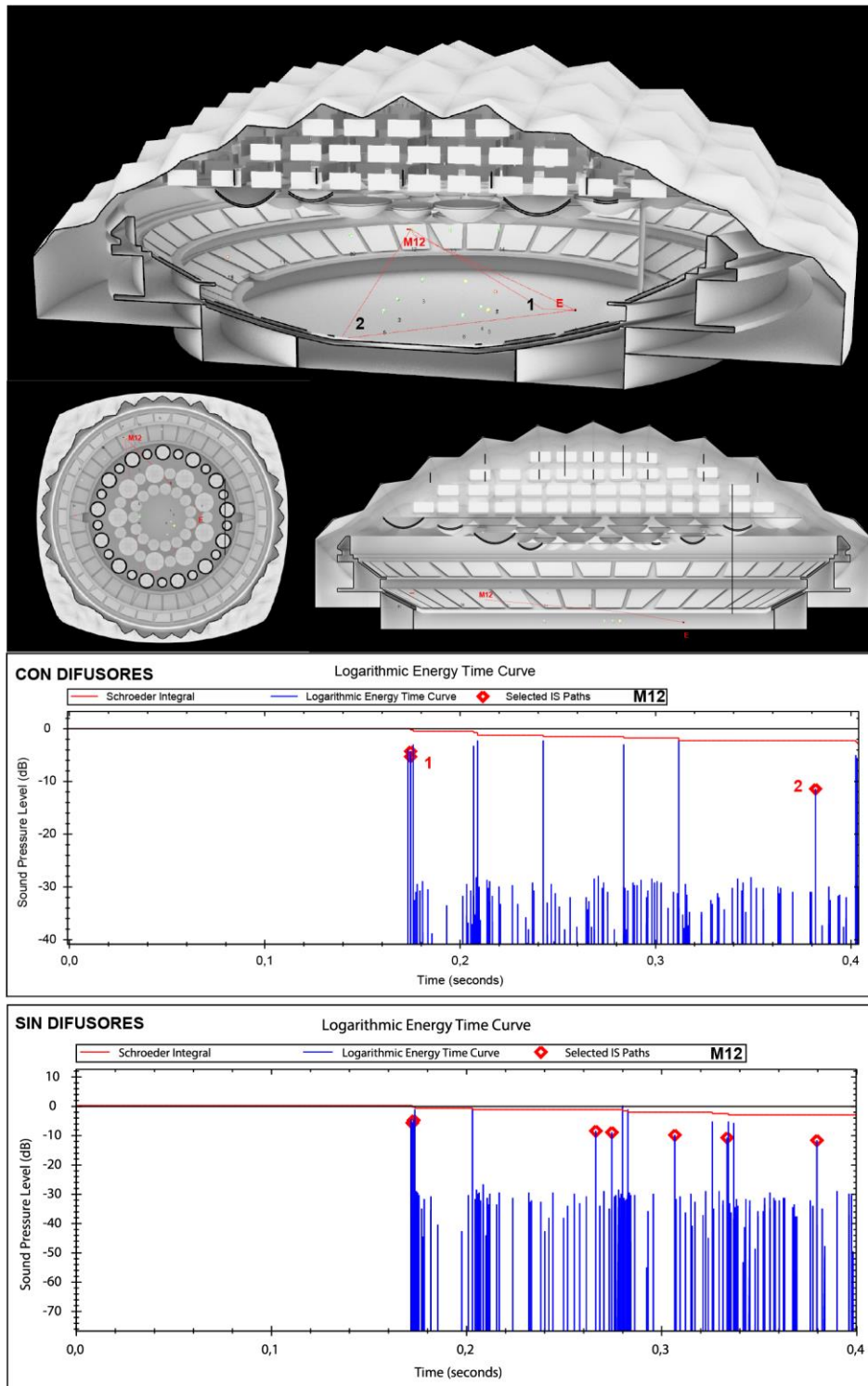


Tabla 21

Análisis de reflejos en pista con tratamiento acústico "F"

Mic.	Reflejo	Diferencia de tiempo [ms]	Diferencia de nivel [dB]	Origen
1	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.5	0	Piso
	2	52.7	-6	Difusor
	3	184.5	-13	Muro perimetral, parte posterior
3	0	0.0	0	Sonido directo
	1	0.9	0	Piso
	2	44.0	-5	Difusor
	3	49.0	-6	Difusor
	4	206.9	-9	Cúpula, parte alta
5	266.9	-11	Cúpula, parte baja	
4	0	0.0	0	Sonido directo
	1	0.3	0	Piso
	2	66.0	-10	Difusor
	3	280.3	-21	Difusor y Muro perimetral, parte posterior
4	293.3	-17	Cúpula, parte baja	
5	0	0.0	0	Sonido directo
	1	0.8	0	Piso
	2	51.4	-6	Difusor
	3	203.8	-14	Muro perimetral, parte izquierda
6	0	0.0	0	Sonido directo
	1	0.5	0	Piso
	2	61.2	-9	Difusor
	3	269.5	-19	Muro perimetral, parte posterior
4	273.5	-15	Cúpula, parte baja	
7	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.1	0	Piso
	2	91.4	-13	Muro perimetral, parte frontal
	3	126.1	-9	Difusor
	4	282.1	-19	Muro perimetral, parte posterior
5	286.1	-15	Cúpula, parte baja	

Tabla 22

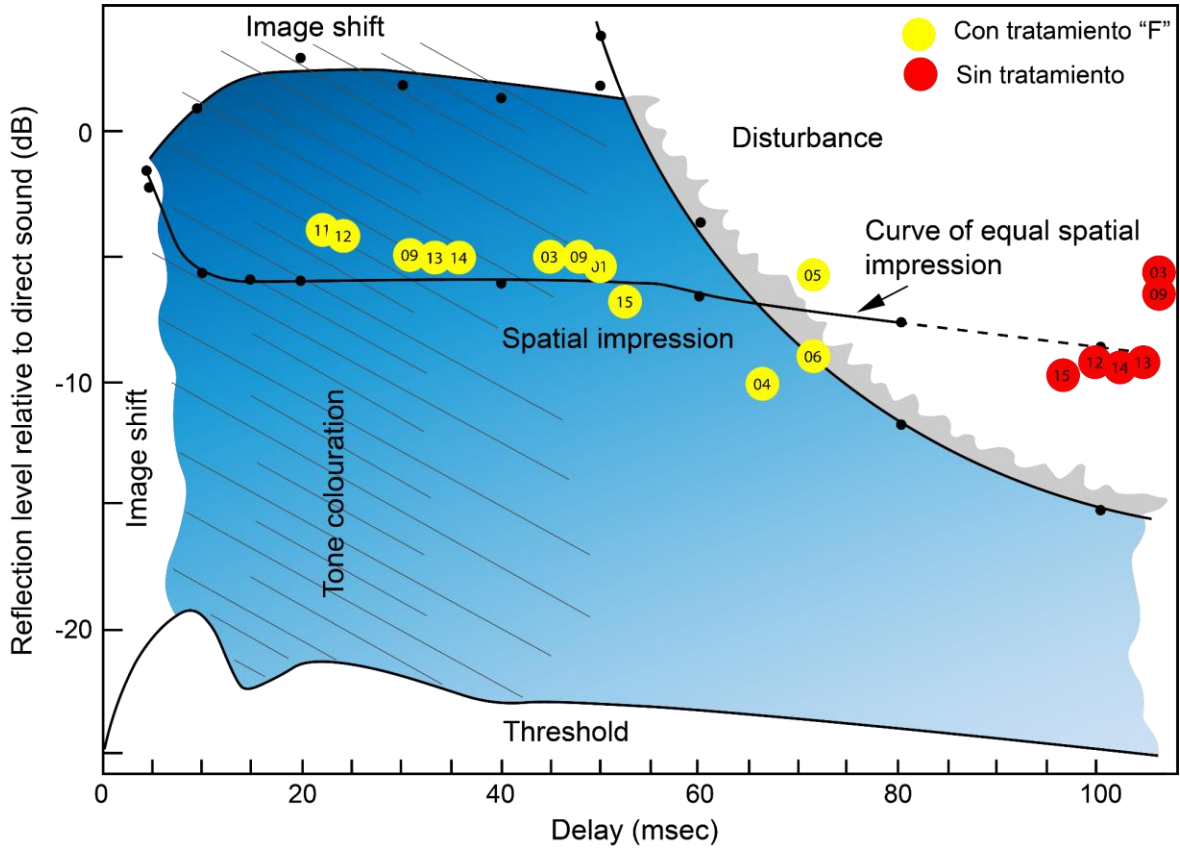
Análisis de reflejos en gradas con tratamiento acústico "F"

Mic.	Reflejo	Diferencia de tiempo [ms]	Diferencia de nivel [dB]	Origen
9	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.3	-3	Piso de pista y de gradas
	2	33.3	-5	Difusor
	3	48.3	-6	Difusor
	4	180.3	-10	Muro de gradas
11	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.4	-3	Piso de pista y de gradas
	2	22.4	-4	Difusor
	3	151.4	-7	Muro de gradas
12	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.5	-1	Piso de pista y de gradas
	2	22.8	-4	Difusor
	3	210.5	-11	Muro de gradas
13	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.7	-2	Piso de pista y de gradas
	2	32.4	-5	Difusor
	3	227.7	-11	Muro de gradas
14	0	0.0	0	Sonido directo
	1	0.5	0	Piso de pista y de gradas
	2	35.0	-5	Difusor
	3	249.5	-11	Muro de gradas
15	0	0.0	0	Sonido directo
	1	1.2	-1	Piso de pista y de gradas
	2	56.6	-6	Difusor
	3	122.2	-8	Muro de gradas

De acuerdo al criterio de Barron, en la figura 92 se ubican los reflejos con y sin tratamiento acústico. La mayoría de los reflejos sin tratamiento acústico tienen un intervalo de tiempo mayor a 100 ms con respecto al sonido directo, por tal motivo no logran aparecer dentro de la gráfica y se consideran ecos molestos. Caso contrario, los reflejos provenientes de los difusores, se ubican dentro del área recomendada. Ayudando a que el escucha experimente la sensación de estar inmerso en la música. Se observa que la mayoría de estos reflejos deseables se registraron en los micrófonos ubicados en las gradas.

Figura 92

Ubicación de reflejos según criterio de Barron



Conclusiones

Como se ha mencionado al inicio de la investigación, el Palacio de los Deportes de la Ciudad de México no fue diseñado para que se lleven a cabo eventos musicales como conciertos dentro de sus instalaciones. Es un recinto diseñado para eventos deportivos, en los cuales el desempeño acústico del recinto es favorable ya que el ambiente del público animando a su equipo se escucha subjetivamente como si se tratara de una multitud aún mayor. Sin embargo, el gran espacio disponible y además techado se presta para que se presenten conciertos especialmente de rock y pop. En pocas palabras sería el lugar ideal para tales fines si no fuera por el mal desempeño acústico.

En esta investigación se realizaron cálculos, mediciones y simulaciones para diagnosticar objetivamente la acústica de este recinto. Con los datos obtenidos se identificó el problema y se validaron las hipótesis. Finalmente, las mediciones y las simulaciones presentaron diferencias en los parámetros acústicos obteniendo valores más altos en la simulación y en los cálculos. Sin embargo, la proporción de estos valores en la simulación es muy similar a la proporción obtenida en la medición a lo largo del ancho de banda. Es decir, las gráficas de ambos métodos presentan una pendiente muy similar entre ellas a lo largo del ancho de banda. Por lo tanto, se calibraron los resultados de los cálculos y las simulaciones con respecto a las mediciones tomando como referencia los resultados de la banda de 1 kHz. Esta calibración se observa en la sección de “Comparación de resultados”. En el caso del análisis de trazado de rayos, las similitudes entre ambos métodos (medición y simulación) coincidieron casi a la perfección y se puede apreciar en los ecogramas obtenidos..

Como se mencionó anteriormente, las diferencias en tiempo de reverberación pueden ser debido a los coeficientes de absorción tomados de la literatura consultada. Los valores obtenidos en los parámetros acústicos están muy lejos de lo recomendado por diferentes investigadores. Afortunadamente, se cuenta con los parámetros acústicos de dos recintos similares que tienen una buena impresión en el público asistente en cuanto a su desempeño acústico. Gracias a lo anterior se validan las recomendaciones y se comprueba el porqué del mal desempeño acústico del Palacio de los Deportes de la Ciudad de México.

En el presente trabajo, se hacen recomendaciones para mejorar la calidad acústica del recinto. Estas recomendaciones como se mencionó anteriormente tienen un análisis exclusivamente acústico, es decir, no se realizaron análisis estructurales ni de presupuesto. De las seis recomendaciones, la recomendación “F” es la que presenta un tiempo de reverberación dentro de lo recomendado además de resolver satisfactoriamente el problema de los ecos molestos. Esta propuesta permite la ubicación del escenario ya sea en el centro o en un extremo de la pista aunque se obtienen mejores resultados con el escenario en un extremo del recinto. Sin embargo, el buen desempeño acústico del mismo depende en gran medida de una correcta estrategia de sonorización por parte del equipo técnico de los artistas.

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 Barron. 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 es una 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 principalmente por el muro perimetral de la misma. En las gradas sucede en mayor medida a causa del domo en forma de cúpula. Los elementos acústicos como materiales absorbentes y difusores descritos en la propuesta “F” resuelven estos problemas concernientes a la acústica arquitectónica del lugar.

Las limitaciones presentadas en este trabajo principalmente fueron la falta de un sistema de sonorización instalado en el recinto del tipo que se emplea en los conciertos. En el lugar se encontraba un telón y parte de los asientos se encontraban cubiertos con una lona, ambos elementos no se encuentran presentes en todos los conciertos que ahí se presentan.

Por lo anterior, esta investigación puede continuar realizando simulaciones y mediciones adicionales en el recinto con diferentes configuraciones de sistema de sonorización en condiciones mas cercanas a las que se tienen en un concierto. Otro punto a investigar es la presencia del público y sus efectos en la acústica del lugar. Además, la realización de simulaciones adicionales de acondicionamiento acústico incluyendo las configuraciones de sistema de sonorización. Esto, podrá permitir llegar a una propuesta de solución similar a la que se realizó en el Royal Albert Hall de Londres en donde se realizó una óptima distribución de altavoces de manera que cubran la totalidad del área donde se encuentra el público con un nivel de presión sonora adecuado además de controlar los reflejos de sonido mediante el uso de difusores incrementando el buen desempeño acústico del recinto para conciertos de música amplificada tipo rock pop.

Anexo – Entrevista con el Arq. José Moyao

Entrevista con el Arq. José Moyao de Arimatea realizada el día 22 de enero del 2022 vía telefónica.

El Arq. José Moyao tuvo la encomienda de rehabilitar el Palacio de los Deportes de la Ciudad de México una vez que OCESA recibió la concesión por parte del Gobierno de la Ciudad de México. Se le solicitó una entrevista para investigar las adecuaciones, resultados, antecedentes etc. de la acústica del recinto.

1. Desde su propia experiencia, ¿cuáles y qué tipo de intervenciones se han realizado para atender las condiciones acústicas del Palacio de los Deportes?

El Palacio como tal es un recinto en el que su origen era ser una sede de las olimpiadas del 68, es un polideportivo donde básicamente lo que se tenía como concepto era todo lo relacionado con basquetbol, gimnasia, etc.

Entonces el ruido es parte del concepto del lugar de origen, con el tiempo (y ha sido una de las cosas que me ha pasado y es importante aclarar) he intervenido en muchos edificios que nacieron con un uso que al pasar del tiempo ha ido cambiando y transformándose en recintos de entretenimiento como conciertos, obras de teatro, etc. El caso es que el primer edificio que me tocó intervenir con valor patrimonial es el Palacio de los Deportes, un edificio que fue diseñado por Felix Candela, Antonio Peyri y Enrique Castañeda Tamborrel fueron los ganadores del concurso que se convocó.

Es una cubierta hecha a base de paraboloides hiperbólicos, es decir, tiene diferentes planos, y esa superficie esta hecha de una red triangular de aluminio sobre la cual se pone una cama de madera, un impermeabilizante y por la parte de arriba el cobre. Esta superficie como tu sabes, el volumen del aire es muy grande, tiene en la parte central de la cúpula más de 50 m de altura, entonces es un volumen muy grande para manejar. Cuando empezaron los conciertos, el primero fue el de INXS y después Billy Joel nosotros no sabíamos nada de lo que ahora sabes de estrategias para medir estas cosas; y te pongo estos antecedentes porque es tan interesante el tema porque esto que te estoy diciendo de el volumen lo se después de muchísimos años de tener asesores en acústica como Cristian Ezcurdia y la gente de Akustik y esta industria literalmente ha sido empírica, ya hoy día es de otra manera.

Entonces, el hecho de ser o de tener esto, tenía 12 segundos de retraso el sonido, o sea tú estabas hasta arriba y veías que la imagen se movía y se seguía oyendo la música porque son diferentes paños y las bocinas estaban colocadas hacia el público. Ahí que naciera con el mutis de “Palacio de los Rebotes”, esa es la razón del apodo; y con el cual, pues con el tiempo ha sido difícil quitarse. Por eso es tan importante hacer las cosas bien.

Y bueno, después se dieron cuenta los ingenieros de audio de los artistas que lo que había que hacer era no dirigir el “PA” (el sistema de bocinas o Line Arrays que se dirigen hacia el público). Entonces lo primero que fue colgantar unas telas que están alrededor de la gente para que el sonido no regrese. Con las telas se hace una superficie sorda y eso es lo que hace que retenga el sonido y ya no rebota. Entonces los diriges hacia abajo, los levantas y los diriges hacia el público. Tienes diferentes elementos de refuerzo. De ahí ya existen un montón de marcas que se utilizan para los conciertos. L’Acoustic es una marca, etc.

Pero bueno, la primera intervención fue simplemente colocar una tela.

¿Cuál sería la solución buena para dejar esto tranquilamente bien? Es que la superficie le pusieras una colchoneta de fibra de vidrio “Owens Corning” que de hecho es una cosa que he planteado desde hace muchos años y que vaya pegada directamente a la superficie y quitar las cortinas, digamos esa ha sido la más barata la de las cortinas, la más fácil y esa es la primera intervención de acuerdo a lo que me preguntaste.

2. ¿Cuáles fueron las evidencias o los indicadores de que era necesario atender la acústica del Palacio de los Deportes?

El rebote constante, el eco que se provoca.

3. ¿Se realizó algún tipo de diagnóstico técnico previo (mediciones acústicas, pruebas subjetivas o psicoacústicas, otras)?

Eso se hizo después ya con los ingenieros. Cada artista trae su equipo, entonces algunos si hicieron mediciones, no se donde están, no las conozco físicamente, se que hicieron algunas cosas en que intervino Cristian Ezcurdia que es uno de mis asesores en acústica desde el proyecto de el auditorio de Guadalajara en el que gané el concurso y la Universidad me lo puso junto con Akustik con Chris Blair.

4. ¿Cuáles fueron las estrategias que resultaron efectivas (modificaciones en el recinto, acondicionamiento acústico, técnicas de ingeniería de sonido, otras)?

Te comento que la más barata fue poner la tela y jaló, funcionó y tu lo sabes, es una superficie hermética, sorda.

5. ¿Las estrategias son comunes para todos los tipos de eventos que se presentan, o se adaptan de manera específica para cada tipo de evento?

El recinto tiene fijo eso, cada uno como te decía tiene formatos diferentes, se hacen en la cabecera, se hacen al centro, un concepto de 360. Entonces la idea es tener colganteado el audio y dirigido al público, no aventarlo hacia la cubierta. Las telas están fijas

6. ¿Se realizó algún diagnóstico técnico posterior o recientemente (mediciones, pruebas, etc.)?

(Se contesta en la 1)

7. ¿Qué evidencias existen del cambio y del mejoramiento en las condiciones acústicas?

La evidencia es que el recinto sigue funcionando para los conciertos de OCESA ya han tenido una variedad de artistas y eventos. Es una superficie techada de 22,000 espectadores. Su aforo máximo cuando se pone cabecera, cuando se pone en 360° puedes hasta tener más sentados porque cuando se usa pista también tiene una grada desmontable que tampoco aísla mucho porque tiene muchos huecos, entonces lo que ayuda es lo que absorbe la gente por la ropa, tu sabes que las bajas frecuencias las toma el pecho del ser humano. Las cosas que han sido interesantes es que no está bien estudiado y ni siquiera normado es la frecuencia de la música en las estructuras. Cuando hicimos Madona que fue con unas gradas temporales se

hicieron mediciones con unas máquinas con el instituto de ingeniería que esas si las tengo por ahí y muestran cómo afectaba la frecuencia, la música. Así como tu haces todo el análisis con coeficientes de seguridad, etc. también con la música. El estadio Azteca nunca fue pensado para un concierto de Michael Jackson o un concierto de Elton John o conciertos donde la gente se excita demasiado, el Palacio está muy bien construido estructuralmente. Pero si afecta muchísimo la frecuencia en las estructuras. En el Estadio Azteca cuando se hizo Michael Jackson se cancelaron los lugares de hasta arriba del balcón, porque se preguntaron que si no le pasaría nada y el ingeniero dijo “no le va a pasar nada, no se va a caer, se va a deformar pero no va a regresar a su estado normal, o sea, si se va a dañar”, entonces esos son como antecedentes que hay que estudiar. Muchas veces cree uno que porque le suban el volumen y no es cierto, tu puedes tener delays por todos lados y que se vaya repitiendo con menor volumen. De hecho el Teatro Telcel se colocó Meyer Sound, equipo bastante bueno. Hoy en día vas a ver la obra de Aladín y te puedes ir a cualquier lado y escuchas como si estuvieras al lado de la pista, es con un sistema que se llama “Constellation”. Se inauguró el teatro Telcel con Wicked, por eso la gente de producción eran de los pocos que sabían operar el Constellation, ahora no lo saben ocupar y están subutilizadas las cosas.

8. En la actualidad, ¿cuáles son las fortalezas y las debilidades de la acústica del Palacio de los Deportes?, ¿dependen del tipo de evento?, ¿de la ubicación dentro del recinto?, etc.

Es un poco repetitivo a lo que te decía, realmente desde que empezó OCESA hasta estos días existe y es uno de los recintos que me han soltado, o sea si tienen muchos eventos.

9. ¿Considera usted que todavía existen oportunidades para mejorar la acústica del Palacio de los Deportes?, ¿qué aspectos merecerían atenderse y cuáles serían sus sugerencias?

Definitivamente lo que te comentaba hace un rato, una de las cosas es que hay que conservar el patrimonio, es un edificio que está catalogado, su geometría interna se debe seguir apreciando. Entonces como te digo, tiene que absorber, pues se pueden poner este tipo de material, estas colchonetas. Las puedes poner con una malla de gallinero, la puedes pintar de negro y quedaría resuelto esa parte.

La cubierta ya está muy lastimada, el cambio de techo es impresionantemente caro, y ese lugar.... Por ejemplo Has estado en la Sala Nezahualcóyotl, entonces sabes que es un recinto alto, pero tiene deflectores acústicos y es un lugar hecho para un solo uso... son conciertos de una filarmónica o un cuarteto donde esos deflectores están colocados para bañar estando el sonido y bañe a toda la gente. Eso si lo pones en el Palacio no va a servir porque el escenario está en la cabecera, otras veces está en el centro, otras está a un lado. Por ejemplo, ahí se presentó Aida donde la mitad del palacio lo hicieron escenario porque era una escenografía enorme. Ahí cantó Pavarotti, U2, una cantidad grande de artistas, entonces dejar algo fijo sería algo muy costoso, pero se puede hacer un recinto con una acústica variable, es decir, plafones que se pudieran mover pero son mecánicos muy caros. Tu vas al Auditorio Nacional y pues tampoco hay un trabajo acústico en el plafón, es muy grande el recinto.

Tu sabes la relación más o menos, la proporción ideal de un lugar a viva voz, es de aproximadamente de 24x24 y esto viene de la ópera que es a viva voz, no tienes micrófono, los

tenores no usan nada de esto. Entonces cuando Wagner empieza con todas sus obras de ópera él hace lo que se llama la “Concha Wagneriana” que es donde está el escenario y donde está la orquesta. Todos eso son a viva voz en una ópera, son instrumentos donde sale el sonido desde la garganta hasta toda la sala pero no estás a más de 24 metros de distancia y el eco se genera a los 17 metros. Entonces, si tu tienes una distancia mayor a esto pues vas a generar ecos, por eso es que son superficies brillantes en los laterales y absorbentes en los fondos, para que no regrese el sonido.

10. ¿Cómo evalúa usted la acústica del Palacio de los Deportes en comparación con otros recintos similares a nivel nacional o internacional?

El Palacio de los Deportes.. en la forma en que se rankean los recintos es.. de 1 a 10 mil espectadores se llama categoría Teatro, 10 mil uno a 20 mil son Arenas, y de 20 mil uno en adelante son estadios.

Entonces el comparar el equivalente por llamarlo así que es la Arena Ciudad de México... la verdad me gusta más como se escucha el Palacio. Porque esa sí la hicieron como una arena de Basquetbol gringa y también tiene los mismo problemas, o sea tiene que estar absorbiendo igual pues es muy grande. El problema de las Arenas es que son recintos que nacieron.. o sea la Arena Ciudad de México está hecho para hacer basquetbol, o sea eso para mi es un super error haber hecho algo de ese tamaño cuando realmente no tiene ni siquiera partidos de basquetbol. En el mundo... tu vas a Europa y por ejemplo está la Filarmónica de Berlín y tiene dos edificios, uno para la Filarmónica y otro para los cuartetos, entonces tienen espacios que cambian en función del tipo de espectáculo.... Hacer una corrida de toros en el Palacio de los Deportes no

va a jalar porque la isóptica tiene una forma muy baja, tienes que arrancar desde un punto más alto .. ¿Porque se oye muy bien en la Plaza de Toros México? ... ¿Por qué el Foro Sol se oye tan bien? Pues porque está abierto, no tiene nada que hacer más que el sonido llegue a donde está el espectador. Entonces el hacerlo en espacios cerrados hace que tengas que estudiarlo bien.

Bibliografía

- Adelman-Larsen, N. W. (2014). *Rock and Pop Venues*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-45236-9>
- Adelman-Larsen, N. W. (2015). Possible Auditorium Design Goals in very large Venues hosting Live Music Concerts. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 37. Pt.3.
- Ando, Y. (1985). *Concert Hall Acoustics*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-69810-1>
- Arau Puchades, H. (1988). An Improved Reverberation Formula, Higiní Arau, *Acustica*, 1988.pdf.
Acustica - International Journal on Acoustics, 65, 163–180.
- Aubanel, V., Lecumberri, M. L. G., & Cooke, M. (2014). The Sharvard Corpus: A phonemically-balanced Spanish sentence resource for audiology. *International Journal of Audiology*, 53(9), 633–638. <https://doi.org/10.3109/14992027.2014.907507>
- Badillo-Almaraz, H., Orduña, A., González, G. A., & Roeder, G. M. (s/f). *Structural modelling and numerical analysis of the Palace of Sports of México City*.
- Barron, M. (1971). The subjective effects of first reflections in concert halls—The need for lateral reflections. *Journal of Sound and Vibration*, 15(4), 475–494. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90406-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90406-8)
- Barron, M. (1995). *Interpretation of Early Decay Times in Concert Auditoria*. 81, 320–331.

- Barron, M. (2001). Late lateral energy fractions and the envelopment question in concert halls. *Applied Acoustics*, 62(2), 185–202. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00055-4](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00055-4)
- Barron, M. (2010). *Auditorium acoustics and architectural design* (2nd ed). Spon Press/Taylor & Francis.
- Barron, M. (2013). Objective assessment of concert hall acoustics using Temporal Energy Analysis. *Applied Acoustics*, 74(7), 936–944. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.01.006>
- Barron, M. (2015). Theory and measurement of early, late and total sound levels in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(6), 3087–3098. <https://doi.org/10.1121/1.4919655>
- Beranek, L. (2004). *Concert halls and opera houses: Music, acoustics, and architecture* (2nd 2004 ed, Vol. 41). Springer. <http://choicereviews.org/review/10.5860/CHOICE.41-4446>
- Bradley, J. S. (2005). Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls. *Acoustical Science and Technology*, 26(2), 170–178. <https://doi.org/10.1250/ast.26.170>
- Bradley, J. S. (2011). Review of objective room acoustics measures and future needs. *Applied Acoustics*, 72(10), 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.04.004>

Candela Outeriño, F., Peyri Macía, A., & Castañeda Tamborrell, E. (1968). Palacio de los Deportes. *Informes de la Construcción*, 21(205), 6–12.
<https://doi.org/10.3989/ic.1968.v21.i205.3796>

Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions UPC, Universitat Politècnica de Catalunya.

Cerdá, S., Giménez, A., Romero, J., Cibrián, R., & Miralles, J. L. (2009). Room acoustical parameters: A factor analysis approach. *Applied Acoustics*, 70(1), 97–109.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.01.001>

Clásicos de Arquitectura: Palacio de los Deportes / Félix Candela. (2014, enero 29). ArchDaily México. <https://www.archdaily.mx/mx/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela>

Clásicos de Arquitectura: Palacio de los Deportes / Félix Candela | ArchDaily México. (s/f). Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://www.archdaily.mx/mx/02-331368/clasicos-de-arquitectura-palacio-de-los-deportes-felix-candela>

Coloquio Internacional Félix Candela: Vida, Obra y Legado · Geometría Arquitectónica—YouTube. (s/f). Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://www.youtube.com/watch?v=671zbabXm38>

Comercial | Fiberglass. (s/f). Recuperado el 24 de octubre de 2023, de <https://www.fiberglass.com.mx/comercial>

Con 31 partidos en el Palacio de los Deportes se realizará la fase final del baloncesto de la olimpiada comunitaria / Olimpiada Comunitaria CDMX. (s/f). Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://olimpiadacomunitaria.cdmx.gob.mx/con-31-partidos-en-el-palacio-de-los-deportes-se-realizara-la-fase-final-del-baloncesto-de-la-olimpiada-comunitaria/>

Construcción del Palacio de los Deportes—Ciudad de México, Distrito Federal (MX13795035340191). (s/f). Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://www.mexicoenfotos.com/MX13795035340191>

Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2017). *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application* (Third edition). CRC Press.

Cremer, L. (1988). Early lateral reflections in some modern concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85(3), 1213–1225. <https://doi.org/10.1121/1.397452>

Dávila Delgado, C., & Orduña Bustamante, F. (2014). *Citlali Davila-FOrduna (16 2014), Estudio Acústico de la sala Xochipilli de la Escuela Nacional de Música y Propuesta de Mejoramiento Usando Difusores.* Congreso Instituto Mexicano de Acústica.

Davis, D., & Martinson, J. (1980, mayo 6). *Using basic energy time curve (ETC) measurements.*

De Bort, I., Acuña Paz Y Miño, J., & Beckers, B. (2023). Graphical representation of multiple sound reflections as an aid to enhance clarity across a whole audience. *Applied Acoustics*, 206, 109305. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109305>

Deines, E., Hering-Bertram, M., Mohring, J., Jegorovs, J., Oberste-Dommies, F., & Nielson, G. (2006). Comparative Visualization for Wave-based and Geometric Acoustics. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 12, 1173–1180.

Do You Know What This Famous Building Used To Be? | The O2. (s/f). Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://www.theo2.co.uk/news/detail/do-you-know-what-this-famous-building-used-to-be>

Egan, M. D. (2007). *Architectural Acoustics*. J. Ross Publishing.

Ermann, M. A. (2015). *Architectural Acoustics Illustrated*. Wiley.

Fields of Acoustics—Explore Sound! (s/f). Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://exploresound.org/what-is-acoustics/fields-of-acoustics/>

Garrido, J. A., Zamarreño, T., & Girón, S. (2012). Virtual models for the prediction of acoustic fields of Manuel de Falla Auditorium in Granada, Spain. *Applied Acoustics*, 73(9), 921–935. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.03.015>

Gołaś, A., & Suder-Debska, K. (2009). *Analysis of Dome Home Hall Theatre Acoustic Field*. 34, 273–293.

Goller, B. (2014). *Espacios Sónicos, Intersecciones entre Arquitectura y Sonido* [Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.

Gómez, J. Ó. G., Kahle, E., & Wulfrank, T. (2016, junio). *Shaping concert halls “EuroRegio2016”*.

Griesinger, D. H. (2013). *What is “clarity”, and how it can be measured?* 015003–015003.

<https://doi.org/10.1121/1.4799418>

Historia del Atletismo los Juegos Olímpicos México 68—Parte VI. (s/f). Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://www.runtimemx.com/post/historia-del-astletismo-los-juegos-ol%C3%ADmpicos-m%C3%A9xico-68-parte-vi>

Holger Rindel, J. (1985, enero). *Attenuation of sound reflections from curved surfaces.* Architectural Acoustics.

Jurkiewicz, Y., Moller, H., Wulfrank, T., & Kahle, E. (2019). *Acoustic optimization of curved architecture in practice: The new Straight Cultural Arts Center in Fuzhou.* 333–340.

KB803 | Noise Control Ceiling Baffles—Kinetics Noise Control | Manufacturer. (s/f). Recuperado el 24 de octubre de 2023, de <https://kineticsnoise.com/kb803/noise-control-ceiling-baffles>

KNP | Perforated Metal Acoustical Panels—Kinetics Noise Control | Manufacturer. (s/f). Recuperado el 24 de octubre de 2023, de <https://kineticsnoise.com/knp/acoustical-panel-absorbers>

Kuttruff, H. (2009). *Room acoustics* (5th ed). Spon Press/Taylor & Francis.

Kuusinen, A., & Lokki, T. (2017). Wheel of Concert Hall Acoustics. *Acta Acustica United with Acustica*, 103(2), 185–188. <https://doi.org/10.3813/AAA.919046>

L. Quintás, P. A. (1968, agosto). Palacio de los Deportes revista-arquitectura-1968-n116. *Arquitectura*, 116, 10–13.

La Cúpula del Milenio—O2 Arena—Ficha, Fotos y Planos—WikiArquitectura. (s/f). Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/la-cupula-del-milenio-o2-arena/>

Lacatis, R., Giménez, A., Barba Sevillano, A., Cerdá, S., Romero, J., & Cibrián, R. (2008). Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 3198–3198. <https://doi.org/10.1121/1.2933348>

Lochner, J. P. A., & Burger, J. F. (1964). The Influence of Reflections on Auditorium Acoustics.pdf. *Journal of Sound and Vibration*, 1(4), 426–454.

Long, M. (2006). *Architectural acoustics*. Elsevier/Academic Press.

Lorenz-K, K., & Vercammen, M. (2006). *From “Knocking ghost” to excellent acoustics—The new Tonhalle Düsseldorf: Innovative design of a concert hall refurbishment.* 28(Pt.2).

Maekawa, Z., Rindel, J. H., & Lord, P. (2011). *Environmental and architectural acoustics and architectural acoustics* (2nd ed). Spon Press.

McEnroe, R. (2015, octubre 16). *El Palacio de los Deportes, un sitio no apto para conciertos / Robbish* [Blog]. Robbish. <https://robmcenroe.wordpress.com/2015/10/16/el-palacio-de-los-deportes-un-sitio-no-pto-para-conciertos/>

Metkemeijer, R. A., Peutz, A., & Associés, B. V. (2002). *The acoustics of the auditorium of the Royal Albert Hall before and after redevelopment.* 3, 57–66.

Meyer, J. (2009). *Acoustics and the Performance of Music* (5th ed.). Springer.

Nowoświat, A., & Olechowska, M. (2016). Investigation Studies on the Application of Reverberation Time. *Archives of Acoustics*, 41(1), 15–26. <https://doi.org/10.1515/aoa-2016-0002>

O2 Arena London Music Venue, Greenwich—E-architect. (s/f). Recuperado el 6 de junio de 2023, de <https://www.e-architect.com/london/o2-arena>

Orduña Bustamante, F., Padilla Ortiz, A. L., & Mena, C. (2023). Assessing the benefits of virtual speaker lateralization for binaural speech intelligibility over the Internet. *Applied Acoustics*, 202, 108966. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109146>

Palacio de los Deportes, México | Eventos y Boletos | Mapa, Viaje y Plan de Asientos. (s/f). Recuperado el 7 de junio de 2023, de <https://www.ticketmaster.com.mx/palacio-de-los-deportes-boletos-mexico/venue/163842>

Palacio de los Deportes Rentar inmueble. (s/f). <https://palaciodelosdeportes.mx/rentar-inmueble/#images-21>

Pätynen, J., Tervo, S., & Lokki, T. (2013). Analysis of concert hall acoustics via visualizations of time-frequency and spatiotemporal responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(2), 842–857. <https://doi.org/10.1121/1.4770260>

Pradeepa, A. C., & Ramachandraiah, A. (2017). *The acoustics of a multipurpose cultural hall*. 8(8), 1159–1154.

Raichel, D. R. (2006). *The science and applications of acoustics* (2nd ed). Springer.

Rangel, J. (2016, octubre 7). *Joselo—Palacio de los Rebotes*. Excelsior.
<https://www.excelsior.com.mx/opinion/joselo/2016/10/07/1121061>

Rossing, T. D. (Ed.). (2007). *Handbook of acoustics*. Springer.

Sánchez, J. (2018, agosto 27). *Cómo hacer que un concierto suene bien en el Palacio de los Deportes*. <https://lifeandstyle.expansion.mx/entretenimiento/2018/08/27/como-hacer-que-un-concierto-suene-bien-en-el-palacio-de-los-deportes>

Savioja, L., & Svensson, U. P. (2015). Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(2), 708–730.
<https://doi.org/10.1121/1.4926438>

Sendra-Salas, J. J. (1970). Acústica gráfica: Un instrumento eficaz para la acústica arquitectónica. *Re. Revista de Edificación*, 11, 29–37. <https://doi.org/10.15581/020.11.35022>

Støfringsdal, B. (s/f). *Desired room acoustical response for amplified music*. 12.

The O2. (s/f). Visit London Guía Turística Oficial. <https://www.visitlondon.com/es/cosas-que-hacer/lugar/281376-o2>

The O2 (London)—All You Need to Know BEFORE You Go. (s/f). Recuperado el 6 de junio de 2023, de https://www.tripadvisor.com/Attraction_Review-g186338-d1063660-Reviews-The_O2-London_England.html

The Official Report of the Organizing Committee of the Games of the XIX Olympiad México 1968

(Vol. 2). (1968). Organizing Committee of the Games of the XIX Olympiad.

Vercammen, M. (2010a). Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part I: Wave Field Approximation. *Acta Acustica united with Acustica*, 96, 82–91.
<https://doi.org/10.3813/AAA.918259>

Vercammen, M. (2010b). Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part II: Geometrical Acoustics and Engineering Approach. *Acta Acustica united with Acustica*, 96, 92–101. <https://doi.org/10.3813/AAA.918260>

Vorländer, M. (2011, diciembre). *Models and Algorithms for Computer Simulations in Room Acoustics*. International Seminar on Virtual Acoustics, Valencia.

Wulfrank, T., Jurkiewicz, Y., & Kahle, E. (2014). Design-Focused Acoustic Analysis of Curved Geometries Using a Differential Raytracing Technique. *Building Acoustics*, 21, 87–95.
<https://doi.org/10.1260/1351-010X.21.1.87>

Xiang, N. (Ed.). (2017). *Architectural acoustics handbook*. J. Ross Publishing.

Tabla de figuras

Figura 1 <i>Arquitectos Antonio Peyri, Enrique Castañeda y Félix Candela elaborando planos del Palacio de los Deportes</i>	14
Figura 2 <i>Palacio de los Deportes</i>	15
Figura 3 <i>Construcción de la cúpula</i>	16
Figura 4 <i>Elementos componentes del Palacio de los Deportes</i>	18
Figura 5 <i>Interior del Palacio de los Deportes</i>	19
Figura 6 <i>Patrón de reflejos en cúpula</i>	21
Figura 7 <i>MEN Arena de Manchester</i>	23
Figura 8 <i>Interior del Manchester Arena</i>	24
Figura 9 <i>Representación en 3D del O2 Arena London</i>	25
Figura 10 <i>Interior del O2 Arena London</i>	26
Figura 11 <i>Tiempo de reverberación recomendado en función del volumen del recinto</i>	28
Figura 12 <i>Representación de reflejos en la ecuación de Rindel</i>	32
Figura 13 <i>Curvas de atenuación y amplificación</i>	33
Figura 14 <i>Principio de "Differential Raytracing"</i>	34

Figura 15 <i>Corte transversal del Palacio de los Deportes</i>	34
Figura 16 <i>Ejemplos de distribución de lugares con el escenario en el centro y en un extremo de la pista</i>	35
Figura 17 <i>Escala de niveles de sonido en dB(A)</i>	45
Figura 18 <i>Caída del tiempo de reverberación y sus medidas</i>	49
Figura 19 <i>Relación entre EDT y T30</i>	50
Figura 20 <i>Representación de C80</i>	52
Figura 21 <i>Valores recomendados de C80(3) según diferentes autores</i>	53
Figura 22 <i>Representación de C50</i>	55
Figura 23 <i>Representación de D50</i>	57
Figura 24 <i>Medición de ITDG</i>	59
Figura 25 <i>Efectos subjetivos de una sola reflexión lateral ($\alpha=40^\circ$) de retardo y nivel variable usando música</i>	61
Figura 26 <i>Ejemplo de ecograma</i>	62
Figura 27 <i>Ubicación y distribución de materiales</i>	67
Figura 28 <i>Comparación de resultados por Sabine y Arau</i>	71
Figura 29 <i>Lonas en el Palacio de los Deportes</i>	73

Figura 30 <i>Diagrama de flujo para la realización de mediciones y obtención de parámetros acústicos</i>	76
Figura 31 <i>Ubicación de fuentes y micrófonos en el recinto</i>	78
Figura 32 <i>Conexión de micrófonos a grabadoras digitales</i>	79
Figura 33 <i>Audio de látigo registrado en micrófonos 3 (pista) y 14 (gradas)</i>	80
Figura 34 <i>Audio de claqueta registrado en micrófonos 3 (pista) y 14 (gradas)</i>	80
Figura 35 <i>Audio de ruido rosa interrumpido registrado en micrófono 3 (pista)</i>	81
Figura 36 <i>Señal de impulso obtenido del barrido senoidal logarítmico en los micrófonos 3 (pista) y 14 (gradas)</i>	82
Figura 37 <i>Señal de impulso del micrófono 3 en pista</i>	83
Figura 38 <i>Gráfica ETC del micrófono 3 en pista</i>	84
Figura 39 <i>Densidad espectral del micrófono 3 en pista</i>	85
Figura 40 <i>Respuesta en frecuencia del micrófono 3 en pista</i>	86
Figura 41 <i>Espectrograma del micrófono 3 en pista (niveles de color en dB)</i>	86
Figura 42 <i>Señal de impulso del micrófono 14 en gradas</i>	87
Figura 43 <i>Gráfica ETC del micrófono 14 en gradas</i>	88
Figura 44 <i>Densidad espectral del canal 14 en gradas</i>	89

Figura 45 <i>Respuesta en frecuencia del micrófono 14 en gradas</i>	90
Figura 46 <i>Espectrograma del micrófono 14 en gradas (niveles de color en dB)</i>	90
Figura 47 <i>Curvas de decaimiento por bandas de octava de los micrófonos 3 (pista) y 14(gradas) de la señal de impulso</i>	91
Figura 48 <i>Resultados de mediciones de EDT en pista y gradas</i>	93
Figura 49 <i>T20 Resultados de mediciones en pista y gradas</i>	94
Figura 50 <i>Relación EDT/T20</i>	95
Figura 51 <i>T30 Resultados de mediciones en pista y gradas</i>	96
Figura 52 <i>C50 Resultados de mediciones en pista y gradas</i>	97
Figura 53 <i>C80 Resultados de mediciones en pista y gradas</i>	99
Figura 54 <i>D50 Resultados de mediciones en pista y gradas</i>	100
Figura 55 <i>TS Resultados de mediciones en pista y gradas</i>	101
Figura 56 <i>Ejemplo de ITDG para micrófonos 3 y 14.</i>	103
Figura 57 <i>Análisis de reflejos y curva ETC micrófono 1 ubicado en pista</i>	110
Figura 58 <i>Análisis de reflejos y curva ETC micrófono 15 ubicado en gradas</i>	111
Figura 59 <i>Animación de reflexiones</i>	113
Figura 60 <i>EDT resultados de simulaciones en pista y gradas</i>	114

184

Figura 61 <i>T20 Resultados de simulaciones en pista y gradas</i>	115
Figura 62 <i>Relación EDT/T20 de simulaciones en pista y gradas</i>	116
Figura 63 <i>T30 Resultados de simulaciones en pista y gradas</i>	117
Figura 64 <i>Relación EDT/T30 de simulaciones en pista y gradas</i>	117
Figura 65 <i>C50 Resultados de simulaciones en pista y gradas</i>	119
Figura 66 <i>C80 Resultados de simulaciones en pista y gradas</i>	120
Figura 67 <i>D50 Resultados de simulaciones en pista y gradas</i>	121
Figura 68 <i>TS Resultados de simulaciones en pista y gradas</i>	122
Figura 69 <i>Análisis de reflejos del micrófono 3 (simulación y medición)</i>	124
Figura 70 <i>Análisis de reflejos del micrófono 15 (simulación y medición)</i>	125
Figura 71 <i>Comparación de EDT (simulación y medición). FE=0.63</i>	130
Figura 72 <i>Comparación de T20 (simulación y medición). FE=0.59</i>	130
Figura 73 <i>Comparación entre T30 promedio en pista de las mediciones y promedio general de la simulación FE=0.72</i>	131
Figura 74 <i>Comparación de C50 (simulación y medición). FE=0.1.57</i>	131
Figura 75 <i>Comparación de C80 (simulación y medición). FE=1.18</i>	132
Figura 76 <i>Comparación de D50 (simulación y medición). FE=0.74</i>	132

Figura 77 <i>Diferencias de TS (simulación y medición). FE=0.94</i>	133
Figura 78 <i>Tiempo de reverberación, valores objetivos (cálculos, simulación y medición)</i>	133
Figura 79 <i>Claridad, definición y tiempo centra, valores objetivosl (simulación y medición)</i>	134
Figura 80 <i>Porcentaje de inteligibilidad (mediante cuestionario)</i>	134
Figura 81 <i>Comparación de volumen y aforo</i>	138
Figura 82 <i>Comparación de tiempo de reverberación</i>	138
Figura 83 <i>Comparación de C80</i>	139
Figura 84 <i>Disposición de difusores acústicos</i>	143
Figura 85 <i>Panel absorbente</i>	144
Figura 86 <i>Corte lateral del difusor</i>	146
Figura 87 <i>Áreas evaluadas en la simulación</i>	148
Figura 88 <i>T20 de los arreglos de tratamiento acústico</i>	150
Figura 89 <i>Animación de reflexiones acústicas con y sin difusores</i>	151
Figura 90 <i>Análisis de reflejos del micrófono 4 (con tratamiento y sin tratamiento acústico)</i>	154

Figura 91 *Análisis de reflejos del micrófono 12 (con tratamiento y sin tratamiento acústico)* 155

Figura 92 *Ubicación de reflejos según criterio de Barron* 158