

Diseño de paredes y techos equipotenciales para espacios arquitectónicos con acústica especial



*Aguayo González, Ricardo
Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México
División de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Arquitectura
Calle del Puente No. 222, Ejidos de Huipulco, Tlalpan
14380 México, D. F.
Tfn: 54 83 22 06
Fax: 54 83 21 63
E-mail: raguayo@itesm.mx*

PACS: 43.55.BR

Resumen

En el mundo de la ciencia acústica existen dos grandes vertientes, el de la acústica estadística y el de la **acústica geométrica**. Esta última trata del diseño espacial (gráfico y geométrico) de superficies (techos y paredes) para lograr primeras reflexiones acústicas útiles en edificios, como teatros o auditorios por ejemplo, y es abordada de manera especial por los arquitectos.

Sin embargo hay que apuntar que en casi todos los libros sobre diseño acústico arquitectónico, se trata profusamente la parte estadística tocando la geométrica, en el mejor de los casos, de forma anecdótica. Esto constituye un problema de lectura para los arquitectos a quienes va dirigido este tipo de escritos, ya que su lenguaje natural de comunicación es gráfico y no matemático.

Es por todo lo expuesto que en este artículo se presentan: (1) las bases teórico/geométricas del diseño de techos y paredes equipotenciales; (2) el proceso gráfico de diseño de un techo acústico equipotencial complejo para un teatro; (3) y la comprobación gráfica de ausencia de ecos.

Palabras clave: acústica, geometría, techos, paredes, diseño, arquitectura.

Abstract

In the world of acoustic science two great slopes exist, the one of the statistical acoustics and the one of geometric acoustic. This last one deals with the space design (graphical and geometric) of surfaces (ceilings and walls) to obtain first useful acoustic reflections in buildings, like theaters or audiences for example, and is boarded in a special way by the architects.

However it is necessary to point that almost in all the books of acoustic architecture design, the statistic part is profusely cover touching the geometric, in the best one of the cases, in anecdotal form. This constitutes a reading problem for the architects to those who it's directed this type of writings, since its natural language of communication is graphical and non mathematical.

It is by all the exposed here in this articulate that shows: (1) the geometrical/theoretical bases of the design of ceilings and equipotent walls; (2) the graphical process of design of an acoustic equipotent complex ceiling for a theater; (3) and the graphical verification of absence of echoes.

Key words: acoustic, geometric, ceilings, walls design, architecture

Introducción

Dentro de la ciencia acústica aplicada a la arquitectura existen dos grandes campos: el de la **acústica estadística** y el de la **acústica geométrica**.

El primero de ellos, *acústica estadística*, se refiere a los cálculos de los parámetros sonoros que caracterizan un espacio construido. Este campo es abordado habitualmente por los Físicos y los Ingenieros. Un ejemplo del tipo de cálculos que se realizan en este campo es el del *tiempo de reverberación*. Ver ecuación 01.

El segundo, *acústica geométrica*, se refiere al diseño de superficies que proveen primeras reflexiones útiles hacia la zona de oyentes, garantizando un nivel de presión sonora y una inteligibilidad de la palabra uniforme en todo el recinto.

$$RT = \frac{0.161V}{A_{\text{tot}} + 4mV}$$

donde:

- V** Volumen del recinto (en m³).
- Atot** Absorción total del recinto (en sabins).
- 4mV** Absorción producida por el aire (en sabins).

Ecuación 01. Fórmula de Sabine para el cálculo del tiempo de reverberación.

Su base es tratar a los rayos sonoros como rayos de luz (reflexiones especulares) y es particularmente importante para los arquitectos ya que determina la fisonomía del espacio diseñado.

Un ejemplo en este campo lo constituyen los techos acústicos equipotenciales de auditorios, salas de conferencia y teatros. Ver figura 01.



Figura 01. Los reflectores A, B, C, D y E constituyen el techo acústico equipotencial de este teatro.

Reflexiones acústicas especulares

Como ya se mencionó, la acústica geométrica y, por ende, el diseño de techos acústicos equipotenciales, se basa en tratar a los rayos acústicos como rayos de luz. Es por ello que los reflectores que conforman los techos equipotenciales deben seguir las reglas de las reflexiones acústicas especulares.

La norma principal de este tipo de reflexiones es que el ángulo (α) con que un rayo sonoro impacta a un reflector acústico es el mismo con que ese rayo es reflejado (β). Ver figura 02.

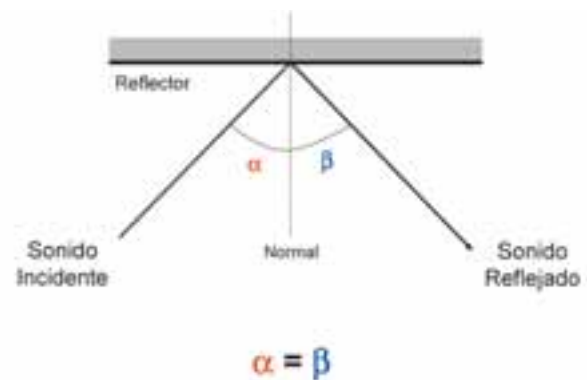


Figura 02. Norma gráfica de las reflexiones acústicas especulares ($\alpha = \beta$).

Aplicación de las reflexiones acústicas especulares al diseño de techos equipotenciales

Para saber, gráficamente, la trayectoria y el ángulo de salida de un rayo sonoro reflejado de manera especular por una superficie, simplemente hay que colocar una imagen de la fuente sonora al otro lado de dicha superficie. Ver figura 03.

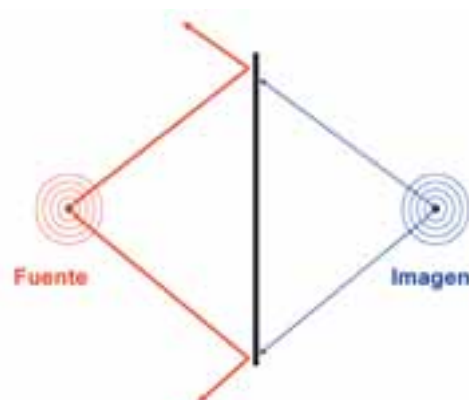


Figura 03. Método gráfico para conocer la trayectoria y ángulo de salida de un rayo sonoro al chocar de manera especular con una superficie mediante la imagen de la fuente sonora.

Las reglas que se deben cumplir en la colocación de la imagen de la fuente sonora son dos (ver figura 04):

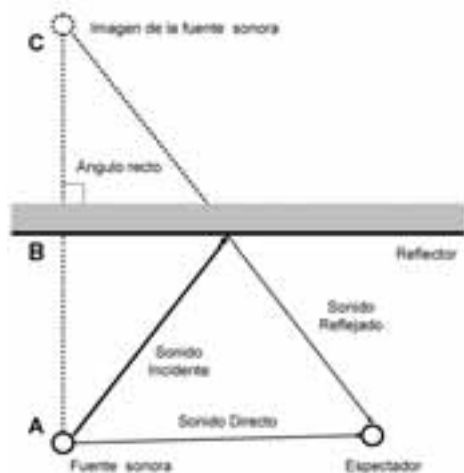


Figura 04. Reglas gráficas para la colocación de la imagen de la fuente sonora.

- 1) Que la distancia de la fuente sonora al reflector (A-B), sea la misma que del reflector a la imagen (B-C).
- 2) Que la fuente sonora y la imagen estén en línea recta y formen un ángulo de 90° con respecto al reflector.

Si tenemos un auditorio, por ejemplo, y queremos saber que sección del techo debe ser reflectante para proveer de primeras reflexiones útiles a la zona de audiencia, hay que proceder de la siguiente manera (ver figura 05):

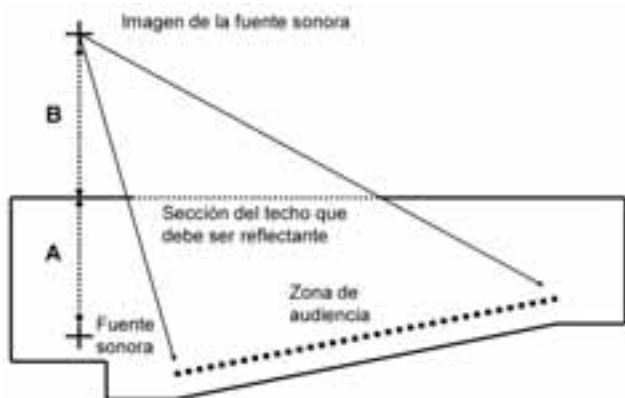


Figura 05. Estudio geométrico para determinar la sección del techo de un auditorio que debe ser reflectante hacia la zona de audiencia.

- 1) Dibujar el perfil del auditorio en estudio a escala.
- 2) Ubicar la fuente sonora, en este caso al orador, sobre el escenario.
- 3) Determinar la zona de audiencia.

- 4) Ubicar la imagen de la fuente sonora cuidando que esté en línea recta (A-B) con la fuente sonora, ambas a la misma distancia del reflector (techo en este caso) ($A = B$) y formando un ángulo recto (90°).
- 5) Desde la imagen lanzaremos dos líneas, una al comienzo de la zona de audiencia, y la otra al final de la misma.
- 6) El plano del techo delimitado por estas dos líneas es aquel que deberá ser acústicamente reflectante para proveer de primeras reflexiones útiles a la zona de audiencia logrando con esto un nivel de presión sonora y un grado de inteligibilidad de la palabra uniforme en el espacio.

Diseño de un techo acústico equipotencial complejo para un teatro

Usando como base el teatro de la figura 01, seguiremos paso a paso el proceso de trazado de su techo equipotencial apoyándonos en lo ya visto sobre reflexiones acústicas especulares.

El procedimiento de diseño de cada uno de los reflectores que conforman el techo acústico equipotencial del teatro en estudio es el mismo. La secuencia a seguir en todos los casos (figuras 06 a 10) es la siguiente:

- 1) Tirar una línea con la inclinación deseada para el reflector en turno.

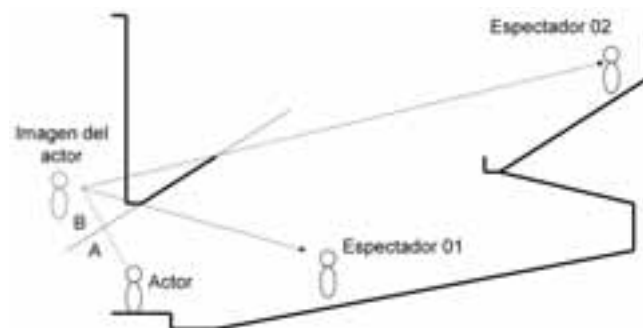


Figura 06. Diseño gráfico/geométrico del reflector A del techo acústico equipotencial de un teatro.

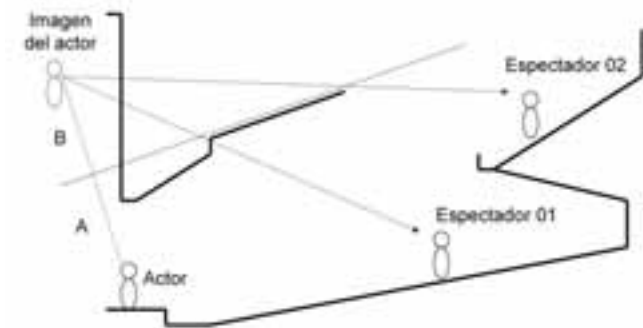


Figura 07. Diseño gráfico/geométrico del reflector B del techo acústico equipotencial de un teatro.

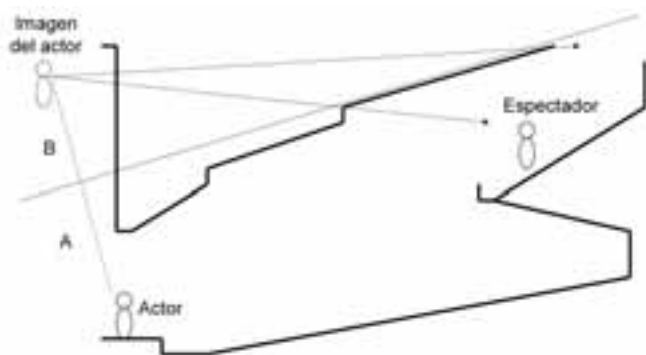


Figura 08. Diseño gráfico/geométrico del reflector C del techo acústico equipotencial de un teatro.

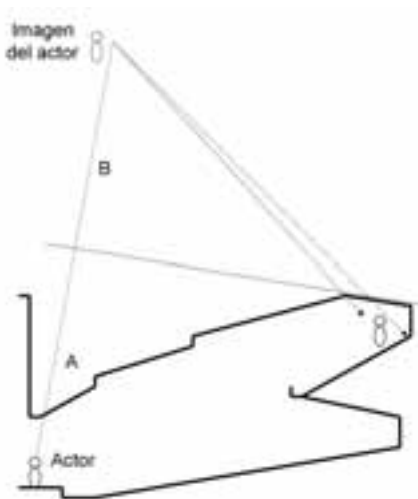


Figura 09. Diseño gráfico/geométrico del reflector D del techo acústico equipotencial de un teatro.

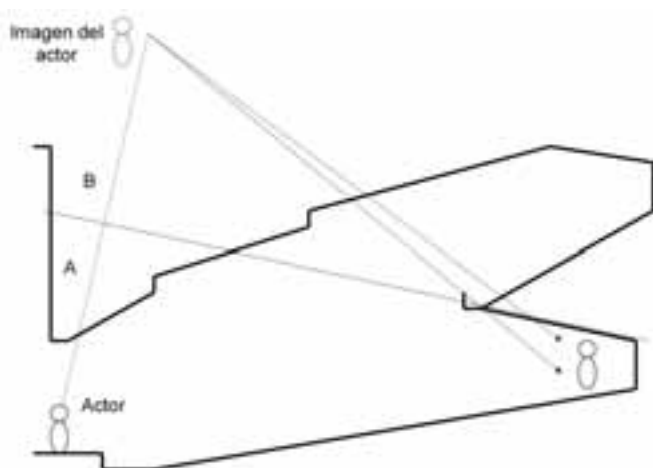


Figura 10. Diseño gráfico/geométrico del reflector E del techo acústico equipotencial de un teatro.

- 2) Ubicar la imagen de la fuente en sonora (en este caso el actor) cuidando que (a) forme una línea recta con la fuente sonora, (b) que dicha recta con respecto al reflector forme un ángulo recto (90°), y (c) que exista la misma distancia entre la imagen de la fuente sonora y el reflector, así como del reflector a la fuente sonora ($A = B$).

- 3) Es de capital importancia determinar el área de audiencia a cubrir por cada uno de los reflectores. Como regla general podemos decir que se debe reforzar particularmente la zona media y muy especialmente la zona más alejada del escenario que es la que cuenta con la menor aportación de sonido directo. La parte frontal de la audiencia no suele reforzarse por medio de reflectores debido a que el sonido directo en esa zona es elevado por su cercanía al escenario y si se reforzara con sonido reflejado por el techo podría provocar un nivel de presión sonora desagradable para los oyentes ubicados en ese punto.

- 4) Es necesario, en cuanto a las dimensiones de los reflectores, el respetar la recomendación que dice que estos deben tener al menos cinco veces la dimensión de la longitud de onda del sonido a ser reflejado, esto con el fin de evitar el fenómeno de difracción, es decir, que el sonido por su longitud de onda “le de la vuelta” al reflector. Tan sólo recordar que un sonido con una frecuencia de 20 Hz, por ejemplo, tiene una longitud de onda de 17m ($340 \text{ m/s} / 20 \text{ Hz} = 17 \text{ m}$).

Hay que dejar claro que, por lo anteriormente dicho (punto 4), el tratar a los rayos acústicos como rayos lumínicos sólo es estrictamente cierto para frecuencias medias y altas, no para bajas.

De la misma forma también es importante tener presente que, por lo menos para el caso de los espacios arquitectónicos destinados a la palabra (auditorios y teatros), las frecuencias de la fuente sonora (orador/actor) se mueven precisamente en esos rangos ya que el ser humano emite sonido particularmente entre los 500 y 1,000 Hz. Todo esto hay que tenerlo muy presente en el proceso de diseño gráfico/geométrico de un techo acústico equipotencial.

Para reforzar, desde el punto de vista didáctico, el proceso de enseñanza-aprendizaje del diseño de techos acústicos equipotenciales por parte de los alumnos de la carrera de arquitectura del ITESM-CCM, el autor de este artículo construyó durante el año 2003, un Simulador de Acústica Geométrica para Espacios Arquitectónicos (SAGEA 01) en el Departamento de Arquitectura del Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México. Ver figuras 11 y 12.

Un análisis completo de este aparato y su forma de uso puede verse en el artículo titulado “Enseñanza de acústica geométrica en la carrera de arquitectura mediante un simulador óptico” aparecido en esta misma revista en el volumen 35, números 3 y 4, páginas 13 a 17, 3º y 4º trimestres de 2004.



Figura 11. Partes esenciales del SAGEA 01. Foto del autor.



Figura 12. Simulación del funcionamiento acústico del techo equipotencial de un teatro a través del SAGEA 01. Foto del autor.

Sobre este simulador tengo que apuntar que: (a) la idea de un sistema óptico para estudios acústicos no es nueva ya que desde 1936 existen registros de aparatos de este tipo, aunque en ese entonces no utilizaban el rayo láser, y (b) que el primer aparato de este tipo con el que tuve contacto fue uno diseñado por el Dr. Francesc Daumal i Doménech en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB) durante mis estudios de doctorado (1995-2000).

Comprobación de ausencia de ecos

Sabiendo que la velocidad estándar del sonido a 14° C es de 320 m/s, y que el oído humano es capaz de integrar sonidos reflejados con una diferencia de 1/20 de segundo con respecto al sonido directo, tenemos que:

$$320 \text{ m/s} \times 1/20 \text{ s} = 17 \text{ m}$$

De esta forma solo hay que verificar que el recorrido de los sonidos reflejados por el techo acústico equipotencial diseñado, desde que sale de la fuente sonora y hasta que llega a la zona de audiencia, cumpla lo siguiente:

$$\text{Recorrido Sonido Reflejado (SR)} \leq \text{Recorrido Sonido Directo (SD)} + 17 \text{ metros}$$

Con esta comprobación se puede asegurar que las superficies del techo acústico equipotencial no provocarán ecos en el área de audiencia. Ver figura 13.

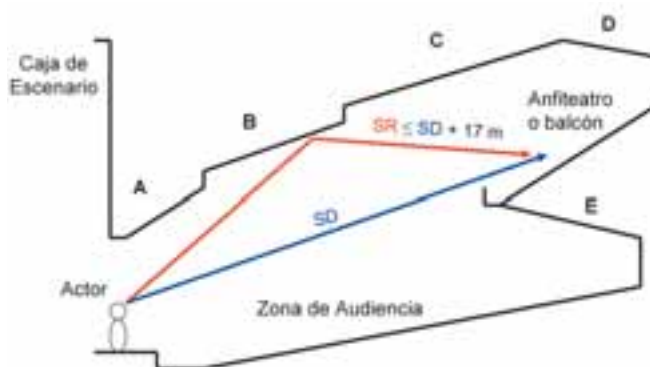


Figura 13. Comprobación de ecos en el área de audiencia del anfiteatro.

Conclusiones

Por mi experiencia docente (ver figura 14) se, que la gran mayoría de los libros sobre acústica aplicada a la arquitectura, están enfocados al campo de la acústica estadística (Ingenieros y Físicos), y solo tocan de manera casi anecdótica, temas de la acústica geométrica (Arquitectos).

DISEÑO ACÚSTICO EN ARQUITECTURA AR99214 (UNIVERSIDAD VIRTUAL)



Figura 14. El autor de este artículo impartiendo la clase Diseño Acústico en Arquitectura AR99214 en formato satelital a toda la República Mexicana. Dicha materia forma parte de la Maestría en Arquitectura de la Universidad Virtual del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Fotos del autor.

Con este panorama y teniendo en cuenta que los encargados de diseñar espacios con acústica especial son, sin duda alguna, los arquitectos, y que dentro del mundo de la ciencia acústica es precisamente la acústica geométrica la que tiene que ver con el diseño de dichos espacios, se podrá comprender fácilmente la importancia que tienen este tipo de escritos para el mundo del diseño y la construcción, en donde se tocan temas capitales en este campo, como por ejemplo, el proceso de diseño gráfico/geométrico de paredes y techos acústicos equipotenciales.

Bibliografía

Aguayo González, Ricardo (2004). *Enseñanza de acústica geométrica en la carrera de arquitectura mediante un si-*

mulador óptico. Revista de Acústica. Volumen 35, números 3 y 4, 3º y 4º trimestres, páginas 13 a 17. España: Sociedad Española de Acústica (SEA).

Carrión Isbert, Antoni (2001). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona, España: Alfaomega.

Knudsen, Vern & Harris, Cyril (1965). *Acoustical Designing in Architecture*. New York: John Wiley & Sons.

Mehta, Madan (1999). *Architectural acoustics. Principles and design*. New Jersey, U. S. A.: Prentice Hall.

Tectónica # 14 (2002). *Acústica*. Madrid, España: ATC Ediciones S. L.

La nueva generación de sonómetros

No es solo una novedad. Es la nueva generación de sonómetros, una nueva presencia en el mundo del ruido ambiental y las vibraciones.

Sin complejidades, está diseñado para hacer la vida más fácil; sin exigencias, trabaja para usted; y además, se adapta a cualquier idioma.

Hecho a su medida

Con más de 60 años como pioneros dentro del mundo del sonido y la vibración, Brüel & Kjær presenta su 4ª generación innovadora de instrumentos manuales para la medida de vibraciones y sonido.

El desarrollo de esta última generación -centrada en el Tipo 2250 - está inspirado completamente en las exigencias de usuarios que participan en seminarios y reuniones en todo el mundo. El hardware ha sido diseñado para cumplir las exigencias específicas ergonómicas de los usuarios, y el software de aplicación abarca todo sobre ruido ambiental, resolución de problemas, salud laboral y control de calidad.

Los paquetes de programas de software se pueden adquirir de forma separada, por lo que usted conseguirá lo que necesita justo cuando lo necesite y además será más fácil adaptarnos a sus exigencias si éstas cambian. De esta forma, la plataforma le asegura su inversión ahora y en el futuro.

Creado, construido y hecho para usted personalmente, verá como el 2250 marca una gran diferencia en su trabajo y en todas sus tareas de medición.

¡Consúltenos!

Para más información, contacte con Brüel & Kjær Ibérica, S.A.

Sede social:

Teide, 5 28700 San Sebastián de los Reyes (Madrid)
Tel.: 91 6590820 Fax: 91 6590824

Delegación:

Valencia, 84-86 interior 08015 Barcelona
Tel.: 93 2264284 Fax: 932269090

www.bksves.com email: bruelkjaer@bksv.com



Tipo 2250

Brüel & Kjær 

PULSE *multi-analizadores*



Las nuevas unidades de adquisición 3560-L y 3560-B se añaden a la familia **PULSE** haciendo posible elegir el modelo exacto que usted necesita.

Desde la medida más sencilla, de un solo canal, hasta las tareas de holografía acústica más complejas en tiempo real multicanal, todas las aplicaciones de acústica y vibraciones están cubiertas con PULSE, un sistema abierto, flexible y 100% compatible con otras aplicaciones.

Con más de 5.000 sistemas vendidos (cifras de abril 2004), PULSE se ha convertido en la plataforma de análisis de ruido y vibraciones de más éxito y mayor crecimiento en el mercado.

2260 Observer es un sonómetro y analizador portátil capaz de realizar todas las medidas y análisis que normalmente se utilizan en la evaluación de ruido en comunidades y entornos de trabajo. 2260 Observer cumple la nueva norma sobre sonómetros IEC 61672, así como las normas IEC anteriores (60651 y 60804) y las normas ANSI más recientes, además de tener la aprobación de modelo.

Todos los parámetros de banda ancha y valores estadísticos se miden en paralelo, de forma que no se pierde ningún detalle: todos los parámetros están ahí, y sólo hay que elegir qué es lo que se desea examinar, ahora o más tarde.

Tipo 2260

2260 *investigator*