

Acústica Arquitectónica

por

Erika Macho Stadler, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea¹

Introducción

Desde que una fuente sonora emite un sonido hasta que dicho sonido se convierte en sensación sonora para un oyente, se produce un conjunto de fenómenos divididos en dos fases claramente diferenciadas. En primer lugar está la transmisión del sonido desde la fuente hasta el oído, es decir todo aquello que acontece con las ondas sonoras desde que salen del foco que las produce hasta que llegan al oyente. Este aspecto se estudia en la *Acústica Arquitectónica*, una parte de la Física un poco marginal y cuyos principios son a menudo ignorados. La segunda fase es la audición de las ondas sonoras en el oído del oyente. Este aspecto constituye la *Física de la audición*, cuyo objeto de estudio es el oído como instrumento receptor de los sonidos.

Este trabajo pretende dar a conocer algunos de los fundamentos de la Acústica Arquitectónica. Podríamos resumir su importancia de la siguiente forma: las salas y auditorios no son exactamente instrumentos musicales, pero afectan siempre a cualquier sonido que se propague en su interior.

¹Con la colaboración de M^a Jesús Elejalde García, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea

Los escritos más antiguos que se conocen sobre este tema datan del año 25 a. C. y se deben a Marcus Vitruvius Pollio, ingeniero militar de Julio Cesar. En ellos se describen diseños para mejorar la acústica de los antiguos teatros romanos. Una de las mejoras propuestas era la utilización de vasijas de bronce afinadas que actuarían como resonadores, y cuya misión sería reforzar ciertos sonidos. Esto no tenía demasiado sentido, ya que el único efecto de tales vasijas sería volver a radiar la energía en una dirección diferente a la inicial, pero nunca reforzar el sonido.

Podríamos decir que la Acústica Arquitectónica nació a finales del siglo XIX de la mano del físico americano Wallace Clement Sabine. Nacido en 1863, en Ohio, estudió en Harvard, y posteriormente ocupó la cátedra Hollis de Matemáticas y Filosofía de esta Universidad. Antes que Sabine, el buen diseño acústico consistía principalmente en imitar las salas en las que la música ya sonaba bien. Este rudimentario diseño acústico consistía en el uso de prácticas supersticiosas, tales como la colocación de alambres inútiles en los espacios altos de una iglesia o auditorio.

En 1895, en la sala de conferencias del recientemente inaugurado Museo de Arte Fogg, apenas se podía entender a los oradores. El consejo de la Universidad de Harvard pidió a Sabine que resolviera el problema. Sabine se enfrentó a este reto con una mente aguda, un buen oído, un cronómetro y un tubo de órgano con un depósito de aire comprimido como fuente sonora. Consideró que el factor que hacía ininteligibles las palabras era la persistencia del sonido en la sala del museo, denominada reverberación. Redujo este efecto colocando fieltro en ciertas paredes, lo que no convirtió la sala en excelente, pero sí en perfectamente utilizable.

Posteriormente fue llamado para asesorar en la construcción del nuevo Boston Symphony Hall. Fue en este proyecto en el que desarrolló con éxito su fórmula de cálculo del tiempo de reverberación, de la que hablaremos más tarde. El edificio fue abierto en 1900, y fue un poco frustrante para Sabine. El valor medido para el tiempo de reverberación de la sala no se ajustaba al que Sabine había predicho teóricamente. Además, la opinión pública criticó mucho la acústica de la sala, por lo que Sabine se sintió desolado y volvió al mundo académico, dedicándose a enseñar durante varios años, aunque siguió asesorando en algunos proyectos arquitectónicos, muriendo en 1919.

Lo más irónico es que los expertos en música que criticaron su obra estaban equivocados. Cincuenta años después de su construcción se realizaron diversas pruebas, y hoy en día la Boston Symphony Hall está considerada como una de las mejores salas del mundo, desde el punto de vista acústico.

En los años sucesivos, diversos autores intentaron mejorar la ecuación del tiempo de reverberación teórico para una sala. En 1929, K. Schuster y E. Watezmann y en 1930 Carl F. Eyring propusieron correcciones a dicha ecuación. Estas fórmulas fueron aceptadas durante más de medio siglo, pero las medidas electrónicas de precisión realizadas en distintas salas, nuevas y antiguas, las pusieron en tela de juicio. Se llegó a la conclusión de que las fórmulas de Sabine y Eyring conducen a sobreestimaciones del tiempo de reverberación.

Recientemente se han logrado nuevos progresos en la teoría del tiempo de reverberación. E. N. Gilbert, de los laboratorios Bell, demostró que la utilización de una ecuación integral alternativa, permitía obtener un resultado por un procedimiento iterativo. De esta manera, Gilbert ha obtenido resultados correctos para distintos recintos con formas sencillas pero interesantes. A partir de 1968, se han desarrollado métodos informáticos de trazado de rayos sonoros con idea de seguir todas las reflexiones que se producen y de esta forma calcular el tiempo de reverberación. Hasta el momento, estas técnicas no han dado resultados mucho mejores que las anteriores, pero los investigadores intentan mejorar estos modelos de simulación, para conseguir un cálculo adecuado del tiempo de reverberación, y de este modo mejorar el cálculo de un conjunto de magnitudes acústicas altamente dependientes del tiempo de reverberación, como el brillo y la calidez, los índices de definición y claridad, etc.

1. Un poco de Física

Antes de comenzar con la descripción del tema que nos ocupa, tenemos que repasar algunos de los fenómenos que se pueden producir durante la propagación de una onda sonora. En un medio homogéneo, como el aire a densidad constante, una onda se mueve en línea recta en la dirección de los rayos. Tales rayos no tienen entidad física, son simplemente líneas perpendiculares a los frentes de ondas que se propagan. A una distancia grande de un foco puntual, una pequeña parte de un frente de onda puede sustituirse aproximadamente por un plano, y los rayos por líneas paralelas. A una onda de este tipo se la denomina *onda plana*.

Cuando una onda incide sobre una superficie límite o de separación de dos regiones con velocidades de propagación diferentes, parte de la onda se refleja y parte se transmite. El primer fenómeno se denomina *reflexión*. El rayo reflejado forma un ángulo con la normal a la superficie igual que el que forma el rayo incidente. El rayo transmitido modifica su dirección original y forma con la normal a la superficie

un ángulo diferente que el rayo incidente. Que el rayo transmitido se acerque o se aleje de la normal depende de la relación entre las velocidades de propagación de la onda en los dos medios. A este fenómeno se le denomina *refracción* y no tiene demasiada importancia en acústica de locales cerrados. Las leyes matemáticas que se cumplen en la reflexión y refracción de una onda cualquiera en la superficie de separación de dos medios se denominan *leyes de Snell*, y se estudian habitualmente en óptica, con los rayos de luz.

La cantidad de energía sonora reflejada por la superficie depende de la clase de superficie. Las paredes, suelos y techos planos son buenos reflectores, mientras que otros materiales menos rígidos y porosos, como la ropa, paños o tapizados absorben gran parte de la energía incidente. Los dos factores de los que depende la reflexión del sonido en una superficie son: la longitud de onda de la onda incidente y la densidad del medio reflector. Dos magnitudes físicas relacionadas con la energía son la *Potencia*, definida como la energía que atraviesa una superficie cualquiera en la unidad de tiempo y la *Intensidad*, o potencia por unidad de superficie.

Cuando una onda sonora llega a una pared rígida (ideal) se refleja totalmente ya que la pared no se mueve y no absorbe energía de la onda. Las paredes reales no son nunca completamente rígidas, por lo que pueden absorber parte de la energía de las ondas incidentes. En este caso, la intensidad de la onda reflejada es siempre menor que la intensidad de la onda incidente. La diferencia entre estas dos intensidades, se denomina intensidad absorbida, y es la suma de las intensidades disipada y transmitida por la pared. Se define el coeficiente de absorción del material como el cociente entre la intensidad absorbida y la incidente, variando su valor entre 0 y 1. Puede decirse que cuanto más blando es un material, más fácilmente absorbe la energía y por tanto mayor es su coeficiente de absorción.

El valor del coeficiente de absorción no depende de la intensidad de la onda incidente, sino del material en el que se refleja y en cierta medida de la frecuencia de la onda. Existen materiales que son buenos absorbentes de frecuencias altas (agudos) y otros de frecuencias bajas (graves). Los materiales absorbentes de agudos poseen superficies porosas o rugosas. Las ondas de longitud de onda larga (frecuencia baja) no perciben estas discontinuidades superficiales, mientras que las de longitud de onda corta (frecuencia alta) se introducen en estas cavidades y pierden su energía de una forma más eficiente. Sin embargo, aquellos materiales que son capaces de vibrar como una membrana, como por ejemplo la madera, actúan como absorbentes de frecuencias bajas.

El público que asiste a un espectáculo actúa como un absorbente de agudos ideal. En efecto, este “absorbente” está formado por pequeñas piezas de aproximadamente 25 cm cubiertas de pelo o telas, de forma que absorbe la mayoría de las frecuencias por encima de 500 Hz. Medidas experimentales muestran que para una persona sentada, el área efectiva de absorción es del orden de 0.5 m^2 , de modo que dos personas absorberían lo mismo que una ventana abierta de 1 m^2 . Este dato es importante, ya que los arquitectos que diseñan las salas deben hacerlo de tal forma que la cantidad de sonido absorbido por un público que llene por completo la sala o por uno que la llene solo a medias, sea similar. Normalmente esto no se consigue al cien por cien.

Pasemos a describir ahora un nuevo fenómeno que tiene gran importancia en Acústica: el hecho de que una onda puede rodear un obstáculo o propagarse a través de una pequeña abertura. Esto ocurre cuando la abertura y la longitud de onda son similares. A este fenómeno se le denomina *difracción*. Las longitudes de onda del sonido audible varían aproximadamente entre 3 centímetros y 12 metros (11300 a 28 Hertzios), y son habitualmente grandes comparadas con los obstáculos y aberturas (por ejemplo puertas o ventanas), por lo que la desviación de las ondas rodeando las esquinas es un fenómeno común. El fenómeno de la difracción nos permite escuchar música en un concierto incluso cuando una persona alta sentada delante de nosotros nos impide ver a los intérpretes. También nos permite oír una conversación a través de una puerta abierta, aunque no veamos a las personas que están hablando.

La comprensión del comportamiento del sonido en recintos es fundamental para conseguir el acondicionamiento acústico correcto. Para enfrentarse a este problema pueden utilizarse tres esquemas diferentes:

- **La acústica geométrica:** se asocia un rayo de propagación a una onda sonora que se propaga en una sala. Para poder aplicar este método las longitudes de onda del sonido deben ser pequeñas en comparación con las dimensiones de la sala y los obstáculos en su interior, para evitar que se produzcan fenómenos de difracción. Además el coeficiente de absorción de las paredes debe ser bajo. Con estas condiciones básicas se cumple la ley de la reflexión. Esta aproximación nos permite suponer que una fuente sonora puntual colocada delante de un plano reflector producirá una fuente imagen a igual distancia del plano, en su posición simétrica. La potencia efectiva de la fuente imagen, energía sonora que irradia la fuente en todas las direcciones del espacio durante 1 segundo, dependerá de la absorción de la pared.

- **La acústica estadística:** imaginemos una fuente acústica que irradia energía en el interior de una sala. Al principio las ondas sonoras se propagan libremente

en el interior del recinto, durante un tiempo que depende de la distancia de la fuente a las paredes de la sala. En un determinado momento las ondas se reflejan en las paredes de modo que las ondas reflejadas y las incidentes se superponen. Si en un determinado instante la fuente deja de emitir, el sonido no desaparecerá inmediatamente, se requiere un tiempo para que la energía sonora acumulada en el interior de la sala sea absorbida por las paredes y se extinga hasta convertirse en inaudible. Esto es lo que se denomina reverberación y es muy importante en el comportamiento de una sala. Para estudiar este fenómeno no basta con examinar el camino seguido por los rayos sonoros emitidos por la fuente, sino que hay que realizar un estudio estadístico de todos los rayos sonoros presentes en el recinto.

• **La acústica ondulatoria:** ninguno de los dos esquemas anteriores tiene en cuenta el carácter ondulatorio del sonido, ya que utilizan las imágenes geométricas de los rayos y las reflexiones. Para abarcar el carácter ondulatorio del sonido hay que abordar el problema de la resolución de la ecuación de ondas con sus correspondientes condiciones de contorno.

2. Acústica geométrica: Auditorios abiertos

Cualquier fuente sonora emite ondas acústicas en todas direcciones, de modo que a una distancia determinada la energía acústica emitida por la fuente queda repartida sobre la superficie de una esfera en cuyo centro justamente se sitúa la fuente sonora. A una distancia de 1 m de la fuente, el área de la esfera sobre la que se reparte la energía es del orden de 13 m^2 , mientras que el área de la oreja (que realiza la captación del sonido) es del orden de 12 cm^2 . De esta manera la energía que se recibe de la onda a esa distancia de la fuente es del orden de 10^4 veces la energía total, y si nos vamos a 2 m esta energía “captada” disminuye a la cuarta parte (recordar que la intensidad sonora sigue una ley del inverso del cuadrado de la distancia).

Este hecho hace pensar que en aquellas situaciones en las que el oído capta poca energía hay que intentar aprovechar al máximo la energía de la fuente que en principio puede perderse. Una manera de aprovechamiento consiste en colocar detrás del interprete una superficie reflectora. De esta manera las ondas sonoras que viajan en la dirección opuesta a la que se sitúa el oyente, se reflejan en la pared y vuelven hacia la zona en la que se sitúa éste. Esta reflexión puede esquematizarse de la siguiente forma: el oído del oyente recibe ondas sonoras reflejadas como si detrás de la pared hubiera otro ejecutante situado simétricamente. De esta forma

el resultado aparenta ser el mismo que el de dos intérpretes ejecutando la misma melodía.

Es lógico pensar que la Arquitectura y la Acústica empezaron a tener relación cuando la gente comenzó a reunirse para escuchar charlas, obras teatrales o música. Los arquitectos griegos construyeron espléndidos anfiteatros abiertos, algunos de los cuales todavía hoy en día permanecen en pie. Estos auditorios consistían en una serie de filas de asientos de piedra, situados de forma escalonada sobre la ladera de una colina. En la zona central se situaba una plataforma de piedra con gruesas paredes y techo de albañilería. El efecto acústico de esta disposición era devolver hacia los oyentes todo el sonido que se dirigía hacia la parte posterior o los laterales del escenario, de modo que se conseguía multiplicar hasta por cuatro la intensidad del sonido recibida por los oyentes. Lo más impresionante de los teatros griegos es la visión que tuvieron sus arquitectos, que conseguían en algunos casos hacer oír a auditorios de 14.000 personas, sin que las filas más lejanas al escenario tuvieran dificultades de audición.

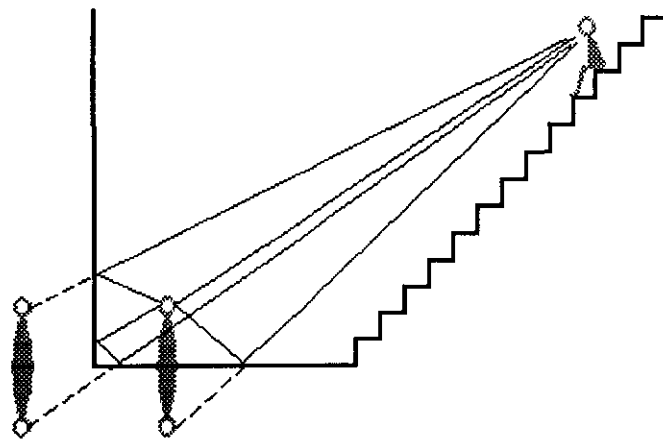


Figura 1: Esquema de la disposición de las gradas y el escenario en un anfiteatro griego.

Un efecto similar de refuerzo sonoro puede conseguirse con una única pared reflectora que se curva hacia la parte interna del escenario. Este método fue utilizado por los romanos en la construcción de teatros al aire libre, como el construido en Verona, que todavía se utiliza hoy en día para representaciones operísticas. Sin

embargo esta solución presenta dificultades de diseño, ya que las paredes curvas pueden focalizar el sonido en un solo punto.

Todos los principios que estaban detrás de los antiguos teatros, se utilizan hoy en día para la construcción de escenarios al aire libre. Este tipo de escenarios tiene a menudo la forma de concha (o un caparazón) y están contruidos con materiales reflectores, de forma que el sonido enviado a la parte posterior del escenario sea devuelto hacia la zona donde se encuentra el público. De esta forma se consigue de nuevo el efecto de incrementar aparentemente el número de instrumentistas. Hay que resaltar que existen límites en el refuerzo sonoro en este tipo de escenarios. En primer lugar y debido a la difracción, solo las frecuencias altas son devueltas eficientemente hacia la zona exterior. Este hecho altera el balance entre las altas y las bajas frecuencias en diferente direcciones. Además, en algunos casos la posición del interprete sobre el escenario es crítica. En estos escenarios, si en lugar de un único intérprete actúa una banda, no existe ningún lugar entre el público en el que la música suene tal y como la oye el director. Por esta razón, a menudo los escenarios al aire libre tienen algunas paredes planas, de forma que se sacrifica la intensidad del sonido para mejorar su calidad.

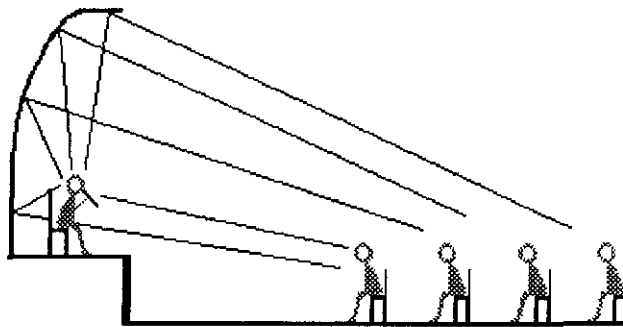


Figura 2: Moderno escenario al aire libre.

3. Acústica estadística: Auditorios cerrados

Cuando se considera qué ocurre con el sonido en locales cerrados, aparecen fenómenos completamente diferentes de los que hemos tenido en cuenta en la sección anterior. Toda la energía de las ondas sonoras se refleja sucesivamente en las paredes, suelo y techo del local. De esta forma, el oyente percibe además del sonido directo

que le llega desde el escenario, aquel sonido que ha sido reflejado una vez en alguna de las superficies, aquel reflejado dos veces, tres veces, etc., de forma que al oyente le llega sonido de prácticamente todas las direcciones. Si las paredes fueran reflectores perfectos, las reflexiones sucesivas se producirían sin límite de tiempo, y este proceso sería de duración infinita. Por supuesto, las superficies reales no son nunca reflectores perfectos, y parte del sonido incidente es absorbido por ellas.

La producción de reflexiones múltiples da lugar a dos consecuencias importantes. En primer lugar el sonido es más intenso que en cualquier auditorio abierto, ya que al oyente le llega mucha más energía sonora por las múltiples reflexiones. La intensidad del sonido depende del tamaño de la sala. Después de los primeros instantes, la energía sonora se ha distribuido por todo el volumen de la sala, por lo que es más intensa en salas pequeñas que en salas grandes, en las que el sonido se diluye más. Este es el motivo por el que hay gente que se divierte cantando en el coche con la radio: la reverberación hace que una pequeña cantidad de energía sonora aumente mucho produciendo el efecto de un coro.

La segunda causa que afecta a la intensidad del sonido recibido por el oyente es el material del que están hechas las paredes. Los materiales blandos, como madera, telas, o tapices, absorben mucha energía en cada reflexión y disminuyen la intensidad sonora. Las ventanas abiertas son las peores: todo el sonido que llega a ellas se pierde. En el otro extremo, los materiales duros, como el hormigón o la piedra, absorben muy poca energía y mantienen muy bien el nivel sonoro. De nuevo pondremos un ejemplo cotidiano: la habitación de una casa en la que más gente canta es el cuarto de baño, ya que las baldosas son materiales duros, y carecen prácticamente de elementos absorbentes.

3.1 Tiempo de reverberación

Si grabamos un sonido seco (por ejemplo el de un cohete) en una sala grande y después reproducimos la cinta muy despacio, escucharemos algo parecido a lo que se ve en la figura 3: primero el sonido directo, después la primera reflexión y por último la superposición del resto de reflexiones, la reverberación. El tiempo de retraso depende únicamente de la distancia que hay entre la fuente sonora y el micrófono. Por supuesto, esta distinción es difícil de hacer si no se ralentiza lo suficiente la reproducción del sonido grabado.

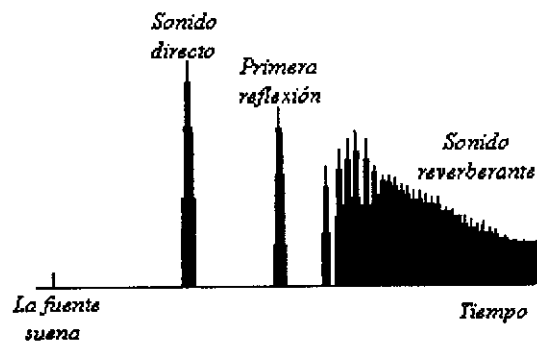


Figura 3: Cronología de la reflexión sonora para un sonido seco.

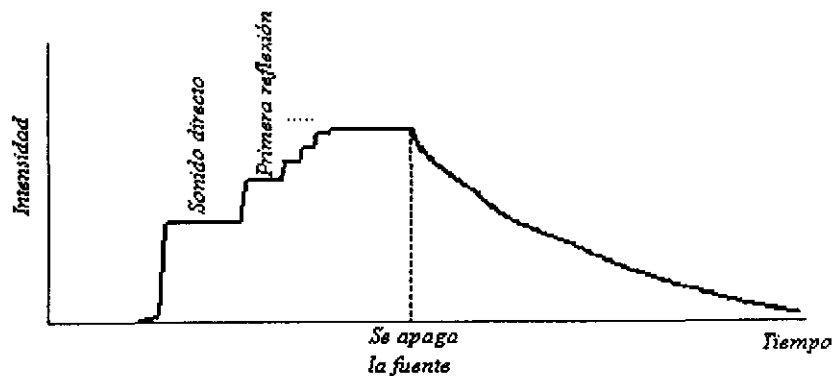


Figura 4: Crecimiento y decrecimiento sonoro para una fuente estacionaria.

Si en lugar de un sonido seco, utilizamos una fuente estacionaria de sonido, el nivel sonoro va aumentando de forma escalonada, a medida que las diversas reflexiones llegan al micrófono. Este nivel continúa aumentando hasta que la energía acústica que proviene de la fuente equilibra la energía perdida en las superficies absorbentes de la sala. Si apagamos la fuente sonora, una vez obtenido este estado estacionario de nivel sonoro, el sonido no se anula inmediatamente, sino que decrece lentamente, como se ve en la figura 4.

El tiempo que tarda en hacerse nulo el nivel sonoro en una sala, depende de lo

intenso que fuera. Sin embargo, para hacer comparaciones es interesante conocer el tiempo necesario para que la intensidad sonora disminuya a la millonésima parte de su valor. Este tiempo se conoce como *tiempo de reverberación*. Si en lugar de hablar de intensidad sonora hablamos de nivel de intensidad acústica, este nivel debe disminuir 60 decibelios por debajo del valor inicial del sonido. Si se realizan medidas del tiempo de reverberación para la misma sala pero diversos niveles sonoros iniciales, se obtienen valores siempre parecidos. Pero si se realiza para diferentes salas, se obtienen valores diferentes, uno para cada sala. Podemos dar como ejemplos el valor del tiempo de reverberación para el teatro de la Scala 1.5 s o el de la Catedral de Colonia 13 s. Si el tiempo de reverberación es largo, todos los sonidos individuales sonarán simultáneamente. Esto puede no tener importancia para la música romántica, por ejemplo, pero puede ser fatal para una conferencia. De esta forma, el cálculo posiblemente más importante desde el punto de vista de la Acústica Arquitectónica es precisamente el del tiempo de reverberación.

3.2 Cálculo del tiempo de reverberación

Cuando una fuente sonora se apaga, el tiempo que tarda en apagarse el sonido depende de cuánta energía se absorba en cada reflexión. La cantidad de energía absorbida por una superficie depende de su tamaño y del material del que esté construida. Estas dos características se combinan en una cantidad denominada *área de absorción efectiva*, que se define como el producto de su área real por el coeficiente de absorción. Con esta definición es fácil concluir que cuando el área de absorción efectiva total aumenta, el tiempo de reverberación disminuye.

La otra cantidad que afecta al decrecimiento del sonido es la rapidez con la que la energía sonora llega hasta las paredes antes de ser reflejada o absorbida. Esto depende de la intensidad del sonido ambiente, que a su vez depende del volumen de la sala. Si la sala es grande la energía sonora se extiende de forma tenue por ella y solo puede ser absorbida lentamente. En este caso el tiempo de reverberación se alargará.

Teniendo en cuenta lo que acabamos de decir, podemos escribir una fórmula para el tiempo de reverberación:

$$T = \frac{0.16V}{A_{ef}},$$

donde V es el volumen y A_{ef} el área de absorción efectiva. Esta fórmula fue establecida por primera vez en 1898 por Sabine. Actualmente se sabe que está

ligeramente simplificada y que sobrestima el tiempo de reverberación en situaciones en las que existe mucha absorción, pero de cualquier forma es suficientemente buena en muchos casos.

3.3 Valor óptimo del tiempo de reverberación

El valor óptimo del tiempo de reverberación depende del uso que tenga la sala. Debe conseguirse un compromiso entre aquellos valores que nos dan claridad por un lado y suficiente nivel sonoro por otro. En salas utilizadas para conferencias, la claridad es primordial, y deben situarse suficientes elementos absorbentes para disminuir el tiempo de reverberación lo más posible. En estos casos, si el nivel de intensidad es bajo, es mejor instalar amplificación eléctrica. Sin embargo, en el caso de salas dedicadas a escuchar música, puede alargarse el tiempo de reverberación, consiguiendo de esta forma una buena intensidad sonora.

Los expertos en Acústica utilizan unos valores de referencia para el tiempo de reverberación para diseñar nuevas salas. Hay que resaltar, que en estos valores utilizados como referencia existe una componente subjetiva, y no hay un acuerdo unánime. Por supuesto los cálculos son sólo una aproximación de cómo será la sala una vez finalizada su construcción. Además, los valores óptimos han de obtenerse para el caso de que la sala esté llena de público, ya que es difícil realizar asientos que absorban el sonido exactamente igual que una persona. En algunos auditorios, se utilizan butacas que tienen pequeñas oquedades en la parte inferior del asiento. La misión de estos agujeritos es imitar la presencia de una persona sentada en la butaca, absorbiendo las frecuencias altas, cuando la butaca permanece plegada.

En la tabla 1 se muestran los valores óptimos del tiempo de reverberación a una frecuencia de 500 Hertzios para diferentes usos de los auditorios. Dichos valores se dan para diferentes tamaños de los auditorios, correspondiendo los valores extremos de los tiempos a los tamaños menor y mayor del auditorio, siendo esta variación aproximadamente lineal en una representación del tiempo de reverberación frente al logaritmo del volumen de la sala. Como se ha mencionado anteriormente, el coeficiente de absorción de los materiales depende de la frecuencia, por lo que el tiempo de reverberación también.

Uso habitual de la sala	Volumen (miles de m ³)	Tiempo de reverberación (s)
Salas de conferencias	0-4	0.4 - 1
Música de cámara	0.3-11	1 - 1.4
Música clásica	2-20	1.5
Música de órgano	1-25	1.5 - 2.3
Opera	10-25	1.6 - 1.8
Música romántica	3-15	2.1

Tabla 1: Valores óptimos del tiempo de reverberación a frecuencia de 500 Hz.

3.4 Diseño acústico de salas

Vamos ahora a repasar algunos de los criterios que se utilizan en el diseño de una sala. En la fase inicial, deben elegirse la forma y dimensiones del recinto compaginando al máximo los criterios acústicos y los estéticos, para que el tiempo de reverberación se corresponda con la actividad para la que está pensado. En este sentido, es primordial definir las dimensiones en función del tiempo de reverberación óptimo y el aforo que tendrá la sala.

El techo es la mayor superficie que puede transmitir el sonido de forma homogénea hacia la audiencia. La altura del techo es vital en el diseño, ya que modifica el volumen de la sala y la transmisión adecuada del sonido hacia la audiencia. En una sala de conciertos suele situarse una placa reflectora detrás de la orquesta (tornavoz) y también se sitúan paneles reflectores en el techo para reflejar y dirigir el sonido hacia los oyentes, como se muestra en la figura 5.

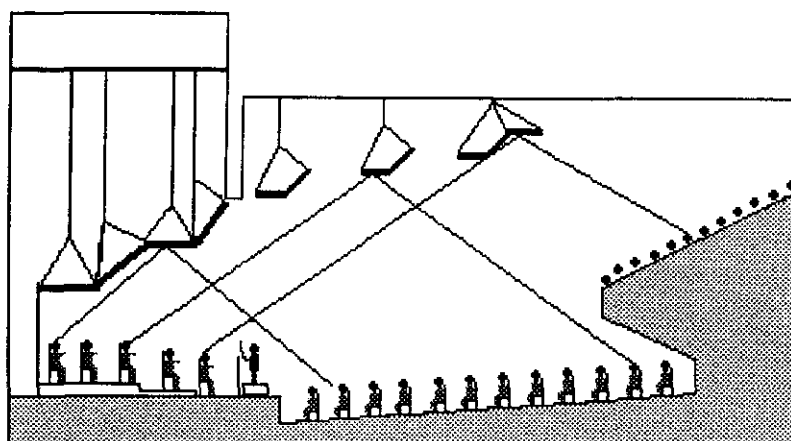


Figura 5: Reflexión del sonido en paneles colgados del techo en una sala.

Dado que el sonido se atenúa por efecto de la difracción, sobre las cabezas de los oyentes de una audiencia, hay que dar al suelo del auditorio la forma más adecuada para limitar este fenómeno. Se puede demostrar que cuando se preserva la línea de visión del escenario para cada oyente, no solo se mejora la percepción visual, sino también la auditiva. La única curva existente, desde el punto de vista matemático, que es cortada en cualquier punto por un radio vector bajo ángulo constante ε , es la espiral logarítmica, y ésta es precisamente la disposición ideal del suelo de un auditorio para preservar las líneas de visión del público con el escenario. La ley matemática de esta curva en coordenadas polares es:

$$r = r_0 \exp(\varphi \cot \varepsilon) \approx r_0 \exp\left(\frac{\varphi}{\varepsilon}\right).$$

Sin embargo, esta expresión no es útil para el diseño, y en la práctica puede aproximarse por segmentos sucesivos de diferente inclinación.

La reflexión de las ondas sonoras juega un papel primordial en el proyecto de salas destinadas a conferencias, conciertos e incluso bibliotecas. En una sala de conferencias con muchas superficies planas reflectoras, es difícil de entender lo que se dice debido a que llegan al oído del oyente multitud de ondas reflejadas. Para reducir estas reflexiones es corriente colocar sobre las paredes y techo materiales absorbentes. Es esencial que el auditorio esté libre de ecos. La reverberación se produce por las diversas reflexiones del sonido por lo que en principio se trata de ecos. Sin embargo estas reflexiones ocurren con tan corto espacio temporal entre ellas, que no se distingue la llegada de una del resto. Lo que no es deseable en un auditorio es el eco entendido como una única reflexión, que prevalece sobre el sonido de la reverberación.

Otro factor importante es que el sonido se distribuya de forma uniforme y con intensidad suficiente en toda la sala. Para conseguirlo, se requiere un cuidadoso diseño del auditorio y los materiales interiores, sobre todo bajo los anfiteatros, y una apropiada inclinación y curvatura del suelo. Además, la intensidad sonora producida en el escenario debe adecuarse al tamaño de la sala: poca intensidad daría lugar a que habría zonas en las que no se oyera y sin embargo, demasiada produciría un efecto estruendoso. Está claro que un auditorio ideado para una orquesta sinfónica puede no ser el mejor para un pequeño conjunto de músicos.

Añadiremos también que una buena acústica exige que la sala esté libre de ruidos no deseados: debe estar bien aislada del ruido exterior y en su interior todos los aparatos que producen ruidos molestos deben ser convenientemente aislados.

Existen otros factores, más intangibles, que modifican la acústica de una sala, y sobre los que todavía no existe un acuerdo completo entre los expertos en acústica. Uno de estos factores, declarado de primordial importancia por algunos expertos, es la denominada *intimidación*. Se define como el intervalo de tiempo entre la llegada del sonido directo y del primer sonido reflejado a una posición donde hay un oyente. Se dice que este tiempo no debe ser mayor que 20 ms, ya que si es mayor la cualidad se pierde y el oyente se siente aislado de la fuente. Para conseguir que esta condición se cumpla es muy importante la altura y distribución de los paneles reflectores suspendidos de los techos.

Otros expertos dan mayor primacía a la dirección de la que llega el sonido reflejado al oyente, sugiriendo que cuando el sonido reflejado proviene de las paredes de la sala el oyente es capaz de situar la fuente sonora espacialmente, mientras que si el sonido reflejado proviene del techo esto no es posible, provocando una cierta confusión. Además, se ha comprobado que nos gusta más la música cuando el sonido percibido por los dos oídos es diferente. Esto tiene relación con la anchura de la sala: en una sala ancha, los primeros rayos sonoros reflejados llegan al oyente desde el techo; en una estrecha, sin embargo, llegan primero los reflejados en las paredes laterales, y estas dos reflexiones son distintas, por lo que las salas estrechas son preferidas frente a las anchas.

3.5 Defectos acústicos y formas caprichosas

El eco es una repetición del sonido original provocado por las reflexiones sobre las paredes, cuando existe una diferencia temporal suficiente (0.05 segundos para el lenguaje, 0.1 segundos para la música) entre el sonido original y el reflejado. En una sala, los ecos se producen a menudo en superficies planas orientadas en direcciones incorrectas, o en superficies cóncavas que tienden a concentrar el sonido en algunos puntos.

Un efecto muy molesto se produce cuando dos paredes planas, buenas reflectoras del sonido, se sitúan una frente a otra. En esta situación, un sonido que se produce entre estas dos paredes se refleja en ambas, rebota simultáneamente en una y otra, produciendo un eco similar a una vibración. Este efecto puede evitarse recubriendo las paredes con un material absorbente. Respecto al techo y el suelo, no se produce este tipo de efectos, porque el suelo está siempre recubierto de absorbentes (butacas, público). Por esta razón no es necesario recubrir el techo con materiales absorbentes, lo que permite utilizarlo como superficie reflectora para distribuir el sonido por toda la sala.

En el caso de superficies cóncavas, dependiendo de la distancia del foco sonoro a la pared y del radio de curvatura de ésta, puede producirse una focalización o una dispersión de los rayos reflejados en la pared. Estos efectos son similares a los que se producen en la reflexión de la luz en espejos cóncavos. En la figura 6 están esquematizados algunos de ellos. Por esta razón, cuando un conjunto de músicos se colocan frente a una pared curva, puede ocurrir que cada grupo de instrumentos se vea reflejado en una dirección diferente a los demás, o que, debido a la focalización, la intensidad con la que son oídos en algunos puntos de la sala sea muy grande y en otros puntos prácticamente no se les oiga.

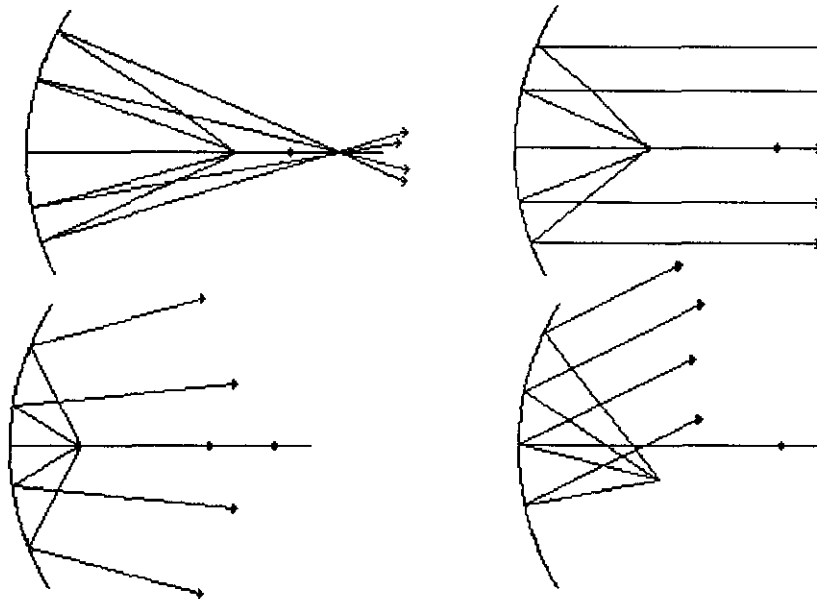


Figura 6: Algunos ejemplos de reflexión de rayos sonoros en paredes curvas.

Estos efectos se producen en muchas construcciones, siendo quizás la más conocida la galería de los susurros de la Catedral de San Pablo en Londres. La cúpula de este edificio, construido por Christofer Wren en 1668, es una semiesfera. Todo el sonido producido en un punto cercano a una pared del edificio es reflejado por ella y focalizado en el punto simétrico al otro lado del edificio. En este punto puede oírse el sonido original con extraordinaria claridad. Actualmente no está claro si este efecto fue intencionado o no por parte del arquitecto. Otro ejemplo más habitual de este tipo de efectos es el que obtenido en los parques infantiles con las parábolas

situadas una frente a otra, para asombro de los niños (y algunos mayores...).

4. Conclusiones

Una de las conclusiones de esta exposición es que el campo de la Acústica Arquitectónica no está del todo desarrollado, hecho que se debe en parte a que descansa fuertemente en juicios subjetivos y criterios estéticos. En los últimos años se han realizado gran cantidad de medidas y experimentos, pero no parece fácil llegar a la definición definitiva de las características que hacen que una sala sea buena desde el punto de vista acústico. Sin embargo, podemos enunciar una serie de reglas cuyo seguimiento proporciona una buena acústica:

- Modificar la forma, orientación y/o desnudez de aquellas superficies en las que se puedan originar ecos, evitando que el sonido se concentre en determinados puntos.
- Favorecer las reflexiones en el escenario, de modo que se obtengan ondas secundarias (primera reflexión) que se propaguen con muy poco retraso respecto de la principal (sonido directo).
- Evitar en lo posible la aparición de ruidos de fondo, tanto internos como externos.
- Finalmente, diseñar salas que mezclen los sonidos, de forma que el sonido que llegue al oído izquierdo de los espectadores sea diferente del que llegue a su oído derecho.

Es difícil que todas estas reglas se cumplan en un solo recinto, por lo que pocos pueden clasificarse de buenos desde el punto de vista acústico, unas veces por mal diseño y otras porque el uso que se les da no es aquel para el que fueron construidos.

Recientemente se han utilizado métodos matemáticos para diseñar paredes y techos irregulares, con salientes y huecos que difunden el sonido en muchas direcciones, en lugar de reflejarlo como un espejo. También empiezan a verse salas *afinables*, en las que se puede ajustar el tiempo de reverberación, bien sea por desplazamiento de paneles absorbentes o por medios electrónicos, para poderse ajustar a diversos tipos de música. La sala Louise M. Davies Symphony Hall, de la Orquesta Sinfónica de San Francisco, se puede afinar mecánicamente, y lo mismo sucede en el Espace de Projection del IRCAM en París.

Y para terminar, un comentario sobre los conciertos al aire libre: este tipo de eventos, que son muy apreciados por algunos aficionados, puede considerarse de

poca calidad acústica. Podemos señalar dos causas: en primer lugar, la música necesita de reverberación (natural o artificial), y en segundo, es difícil evitar el ruido ambiental. Un concierto al aire libre puede resultar muy agradable por diversos motivos, pero nunca por su buena acústica.

Bibliografía

- [An] Y. Ando, *Architectural Acoustics*, AIP Press, 1998.
- [Ar] H. Arau, *ABC de la Acústica Arquitectónica*, CEAC, 1999.
- [E] M. D. Egan, *Architectural Acoustics*, McGraw-Hill, 1988.
- [J] I. Johnston, *Measured Tones*, IOP, 1989.
- [M] J. Meyer, *Acoustics and the Performance of Music*, Verlag das Musikinstrum, 1978.
- [P] J. R. Pierce, *Los sonidos de la Música*, Biblioteca Scientific American, 1985.

